EL02 – P23

Louis Bergès – GU02

Projet d'installation électrique domestique

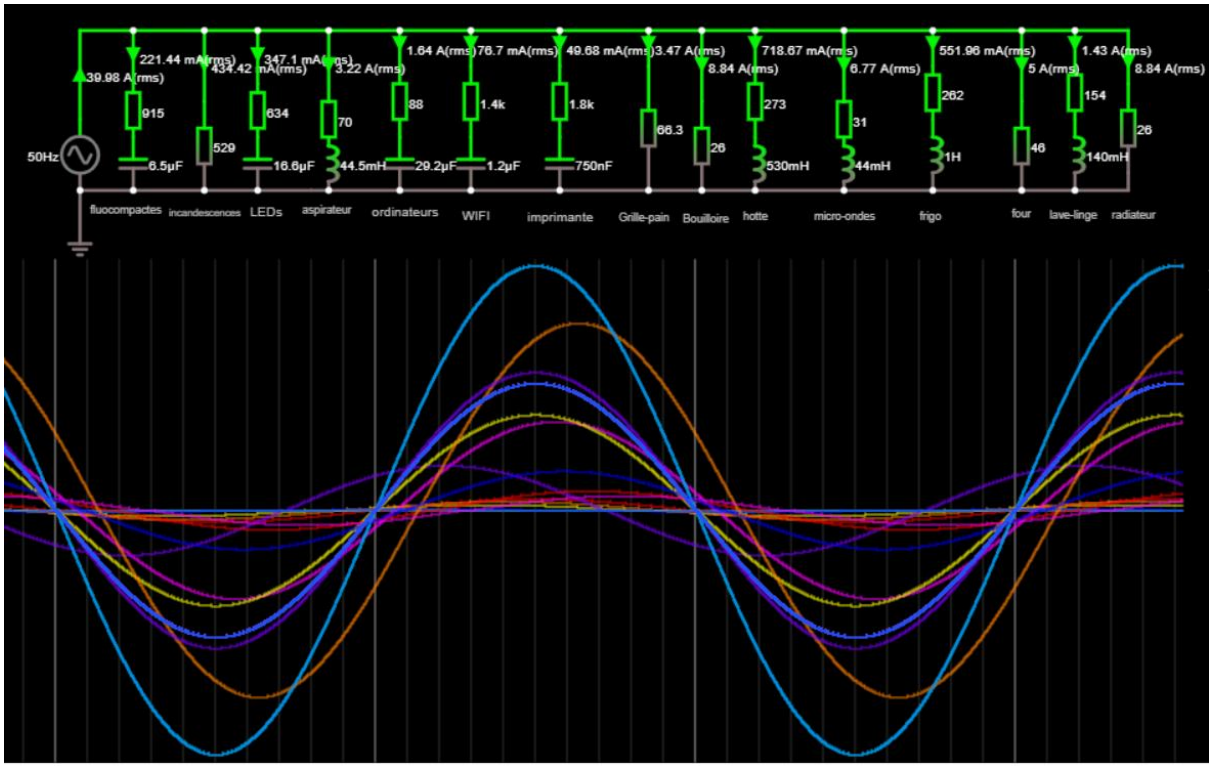


Table des matières

Introduction 3
I) Description de l'installation 4
A) De la production à la consommation d'électricité 4
B) Eléments de facturation 5
C) Description schématique de l'installation 6
II) Elements de protection 9
A) Régimes de neutre, norme NF C 15-100 et rappels de dangerosité 9
B) Protection des personnes 10
C) Protection des biens et des circuits 12
III) Analyse de la consommation électrique 14
A) Démarche 14
1) Les informations constructeurs 15
2) Mesure directe par Wattmètre 17
3) Mesure indirecte par compteur Linky 17
B) Méthode de Boucherot 18
1) Fonctionnement standard de l'installation 18
2) Fonctionnement minimal de l'installation 23
C) Méthode du graphe linéaire orienté et Tellegen 24
1. Simulation du circuit 24
2. Application de la méthode 26
IV) Comparaison à la consommation réelle et perspectives d'amélioration 31
A) Comparaison à la consommation réelle 31
B) Perspectives d'améliorations 33
Conclusion 34
V) Annexes 35
A1 : Schéma unifilaire de l'installation (Q-electrotech) 35
A2 : Bilan global des appareils 36
A3 : Code Simulation 37
A4 : Programme Python Utilisé 38
A5 : Résultat du programme Python 40
Bibliographie 44

Introduction

Ce projet vise à étudier une installation électrique domestique existante. Le choix de l'appartement sur deux étages dans lequel je vis actuellement s'est imposé comme plus pratique et comportant suffisamment d'éléments pour avoir le mérite d'être étudié.

Ce projet permettra d'aborder les notions de cours comme la sécurité électrique, le calcul des puissances actives, réactives, apparentes, des courants et tensions efficaces. De plus, des méthodes des réseaux de Kirchhoff et le théorème de Boucherot et de Tellegen seront utilisés pour les calculs, couplés à des méthodes de résolution numériques sous python.

On commencera par décrire de manière détaillée l'installation électrique. On décrira ensuite certains éléments sécuritaires, reliés à la norme NF C 15-100 puis on réalisera les calculs des circuits électriques. Finalement, avant de conclure, on comparera la consommation électrique trouvée avec la consommation réelle.

Afin de faciliter la clarté de la lecture, certains documents sont directement intégrés au texte et d'autres données en annexe.

I) Description de l'installation

A) De la production à la consommation d'électricité

Le système étudié est localisé en rouge sur le schéma ci-dessous. Il s'agit d'une maison individuelle, installation en monophasée. L'électricité, avant d'arriver dans l'habitat, suit le schéma suivant :

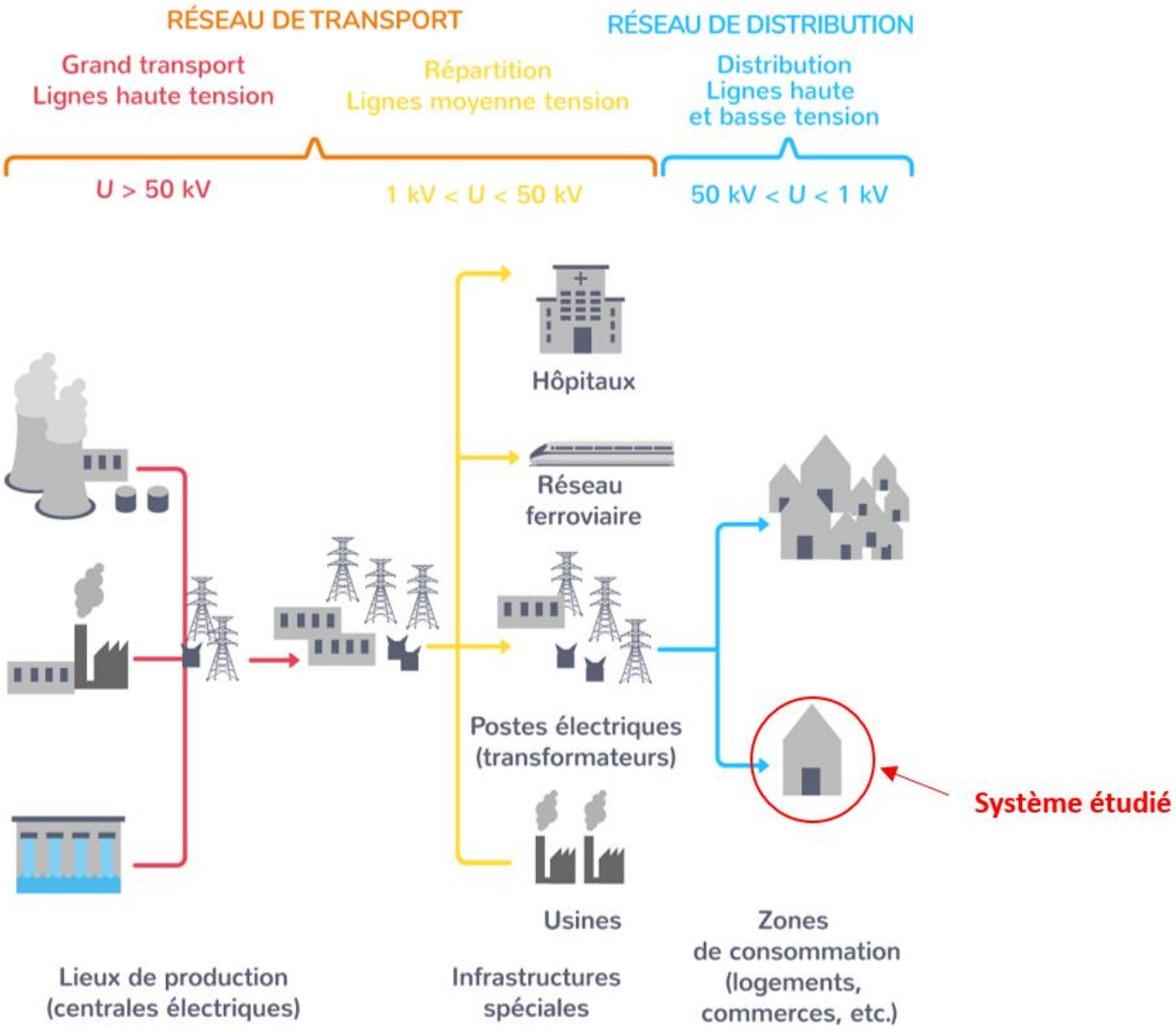


Fig 1 : Production et transport de l'énergie électrique

1) La **production** d'électricité, non représentée sur le schéma, est généralement assurée par **EDF** (même si depuis l'ouverture du marché de l'électricité à la concurrence en 2007, il existe de plus en plus d'autres acteurs décentralisés de production d'énergie)

2) Le **transport haute tension HTB** (afin d'éviter les pertes par effets joules au maximum) est assuré premièrement par le réseau de transport électrique (**Rte**[1]) entre le lieu de production et les postes sources. Ces postes sources, par l'intermédiaire de transformateurs, convertissent alors la très haute tension HTB (**U > 50 kV**) en moyenne tension HTA (1 kV < U < 50 kV).

3) Le **transport haute tension HTA et basse tension BT** est ensuite assuré par **Enedis**, filiale d'EDF se chargeant de distribuer la HTA aux infrastructures la nécessitant (Industries, Hôpitaux) et la BT aux particuliers (cas du système étudié).

B) Eléments de facturation

Grâce à la facture du fournisseur EDF, avec lequel un contrat est souscrit, on peut accéder à la puissance souscrite. On accède également à la puissance souscrite par le compteur Linky disposé à côté du compteur électrique.

La puissance souscrite est de 6kVA. On en déduit immédiatement :

$$I_{eff} = \frac{S}{V_{eff}} = \frac{6000}{230} = 26{,}09\ A$$

Cette valeur correspond donc au courant maximum soutiré par les équipements électriques domestiques.

Fig 2 : Puissance souscrite de 6 kVA affichée sur compteur Linky

[1] Le site Web de RTE a mis en place un outil de suivi **"éCO2mix"** très intéressant permettant de suivre en temps réel la consommation et la production d'électricité en France. Le site est disponible à l'adresse suivante : ***https://www.rte-france.com/eco2mix***

C) Description schématique de l'installation

Afin de décrire l'installation, AutoCAD Electrical semblait particulièrement adapté en tant que logiciel le plus utilisé pour représenter des schémas électriques. Cependant, suite à l'exigence du moteur de la base de données Microsoft Access 2016 pour faire fonctionner le logiciel, difficile à télécharger sur le Web, l'installation n'a pas pu être effectuée. Pour cette raison, la version standard d'AutoCAD a été utilisée. Pour davantage de clarté, deux plans ont été effectués, représentant les 12 pièces constitutives de la maison :

1) Un premier plan architectural, représentant les différentes pièces de la maison et quelques équipements non-électriques.

2) La légende est ensuite donnée, associée aux plans électriques simplifiés des deux étages, sur lesquels sont représentés uniquement les appareils fixes usuels les plus consommateurs d'électricité.

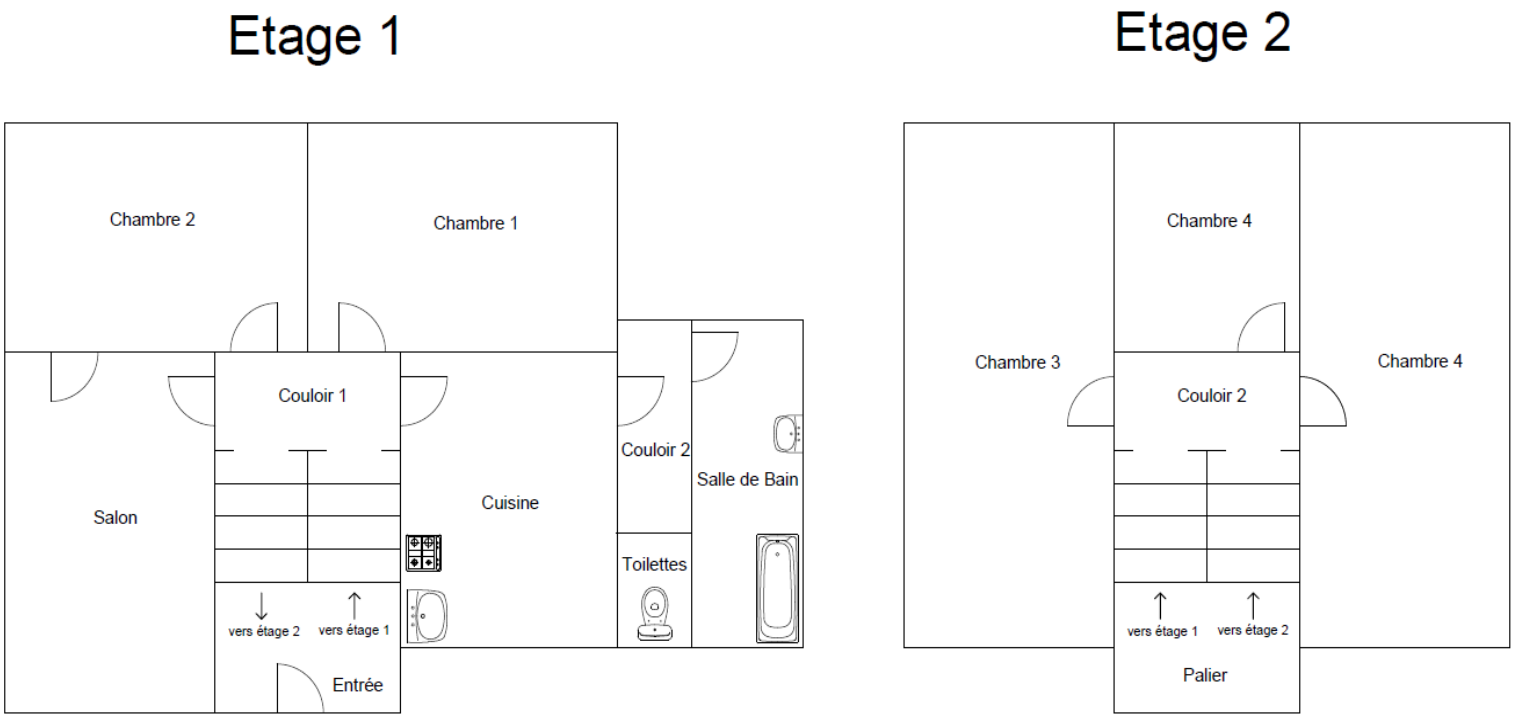


Fig 3 : Plan architectural de la maison

Le choix a été fait de décrire les appareils uniquement dans la partie III) Analyse de la consommation électrique. L'ensemble des appareils est cependant également décrite dans le tableau général en annexe 2.

Légende		
Element	Description	Nombre
	Prise de courant avec terre	28
2	Double prise de courant avec terre	5
TV	Prise TV	2
TP	Prise téléphone	3
	Interrupteur simple allumage	10
	Interrupteur Va et Vient	4
	Fil électrique N+P+T Interrupteur-lampe	13
	Lampe fluocompacte	3
	Lampe LED	11
Machine à laver	Appareil électrique à consommation importante	3

Fig 4 : Légende des plans électriques 1

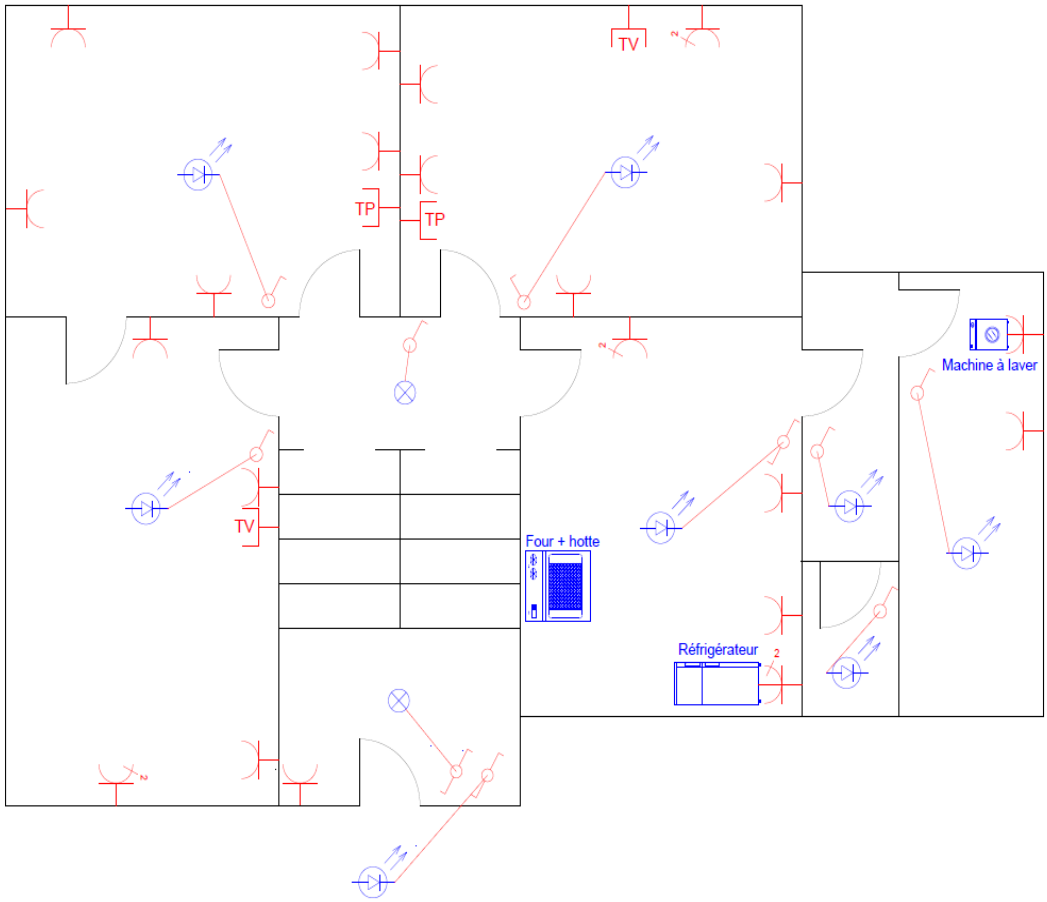


Fig 5 : Schéma électrique simplifié de l'étage 1

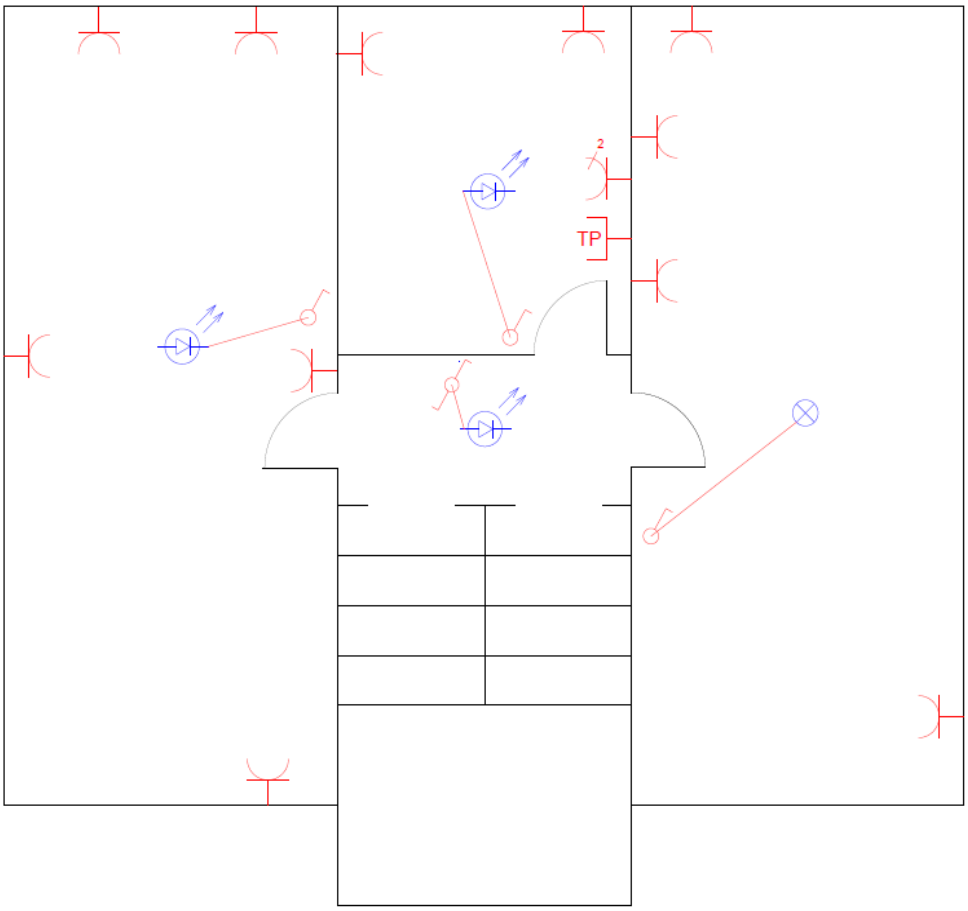


Fig 6 : Schéma électrique simplifié de l'étage 2

Sur les douze interrupteurs différentiels du tableau électrique donné ci-dessous, deux ne desservent aucune pièce, comme observé sur le schéma unifilaire donné en annexe 1.

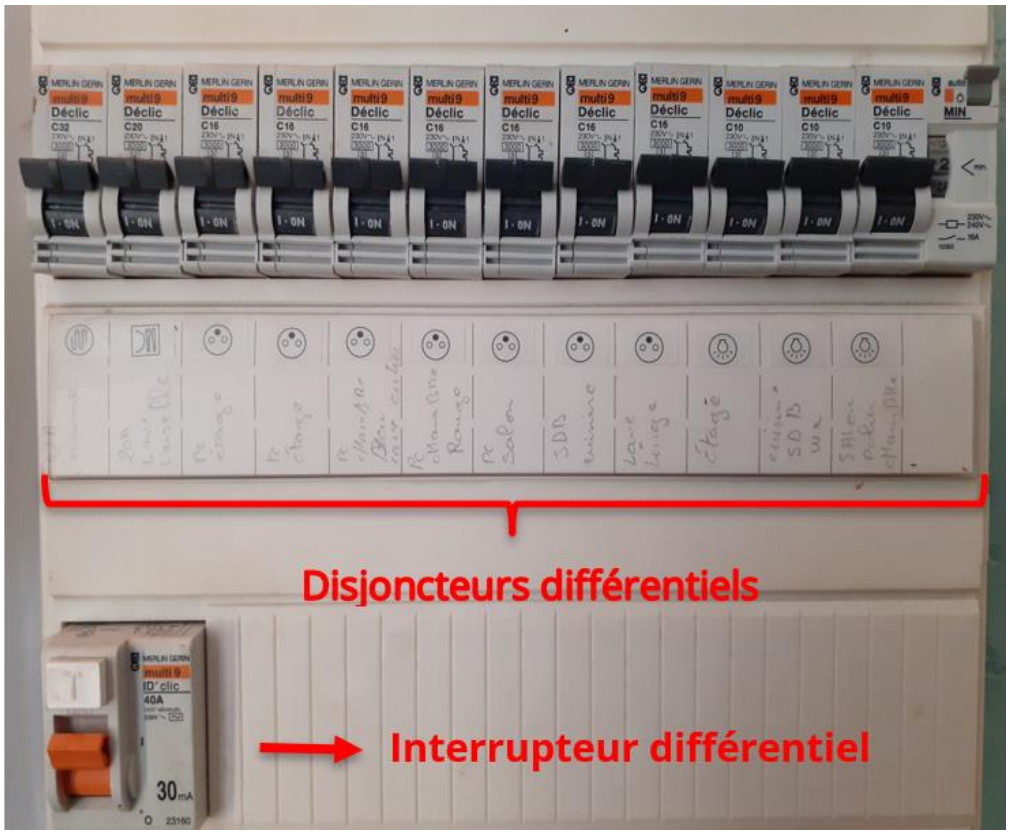


Fig 7 : Photo du tableau électrique

II) Elements de protection

A) Régimes de neutre, norme NF C 15-100 et rappels de dangerosité

L'installation est en régime de neutre "TT", c'est-à dire que le neutre et les équipements sont reliés à la terre tel qu'illustré ci-dessous.

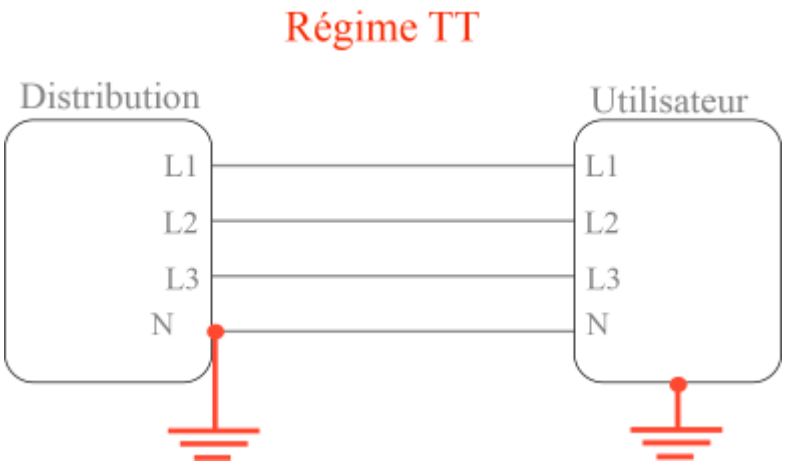


Fig 8 : Régime de neutre TT

Cependant, contrairement à ce qui est indiqué par le schéma (qui s'applique aux gros consommateurs électriques), la maison est en monophasé, c'est-à-dire qu'elle ne bénéficie que d'une seule phase.

La norme NF C 15-100 réglemente les installations électriques en basse tension en France. Elle s'applique en revanche uniquement aux installations neuves ou entièrement rénovées. Le logement actuel n'a pas été rénové, la norme ne s'applique donc pas dessus. En revanche, cette norme doit tout de même être respectée au mieux, car elle tient compte non seulement de la protection de l'installation électrique et des personnes mais aussi du confort de gestion. Celle-ci inclue beaucoup de réglementations, sur la protection des personnes, des circuits, contre la foudre, sur les prises de courants, sur les lumières, le tableau électrique, la salle de bain et le réseau multimédia. Comme il serait trop long de détailler tous les éléments de chacune de ces huit rubriques que contient la

norme, seuls les éléments principaux de la norme vont être explicités dans les parties suivantes.

B) Protection des personnes

La norme stipule qu'il faut au moins deux disjoncteurs différentiels de 30 mA dans le logement et que maximum huit circuits peuvent être supportés par chacun des interrupteurs différentiels. Le disjoncteur différentiel mesure une différence de potentiel entre l'amont et l'aval. S'il en détecte une, le courant est coupé. Il protège les utilisateurs en se déclenchant à partir d'un certain courant de fuite, de l'ordre de quelques dizaines de milliampères généralement, car le seuil de non lâcher est de l'ordre de 10mA. Il y a effectivement au moins deux disjoncteurs différentiels dans le logement (ici douze), mais l'interrupteur différentiel orange supporte douze circuits, donc la norme n'est pas respectée. Concernant les surintensités, la norme impose l'une des configurations suivantes.

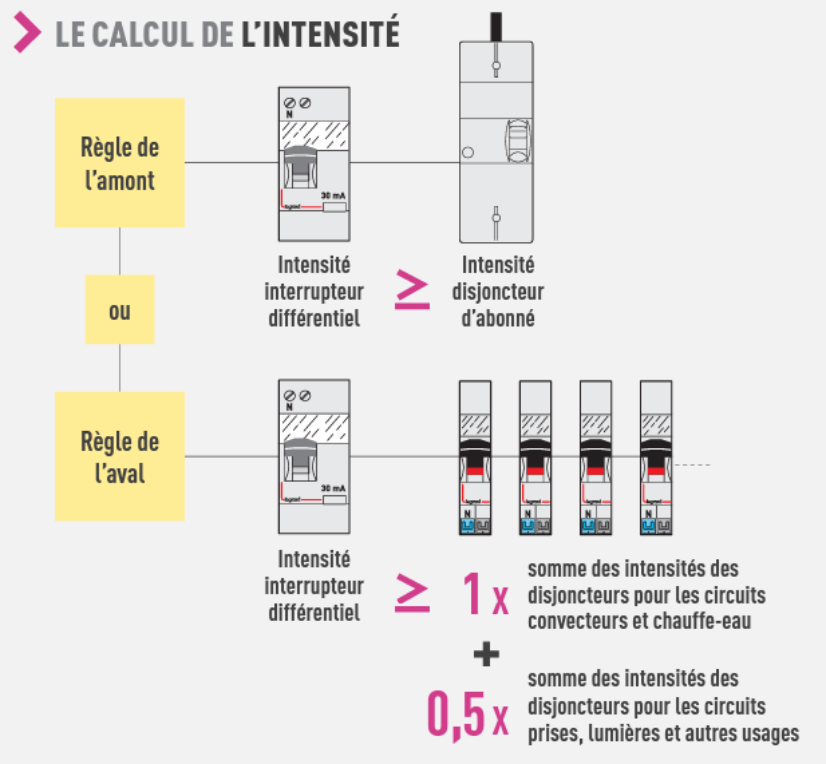


Fig 9 : Gestion des surintensités imposée par la norme NF C 15-100

Dans le cas de la maison, la règle amont est vérifiée, car le disjoncteur d'abonné, en photo ci-contre, possède une intensité limite de 45 A, supérieure aux 40 A annoncés sur l'interrupteur différentiel.

Fig 10 : Disjoncteur d'abonné

Concernant la prise de terre, la norme préconise l'un des raccordements suivants.

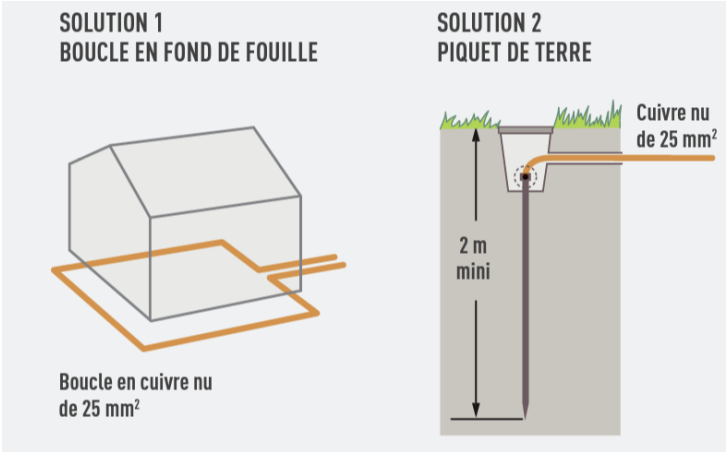


Fig 11 : Raccordements à la terre préconisés par la norme

C'est la solution 2 qui est privilégiée dans le cas de l'habitation, comme observé ci-dessous.

Fig 12 : Raccordement à la terre de l'habitation

C) Protection des biens et des circuits

Les conducteurs électriques rencontrés sont de trois couleurs différentes : rouge pour la phase, bleu pour le neutre et jaune/vert pour la terre (ou masse) tel qu'illustré ci-dessous.

Fig 13 : Identification des conducteurs électriques

La maison étant assez ancienne, certains fils électriques visibles pouvaient être à nus directement en tirant sur l'ampoule, comme on l'observe ci-dessous.
On observe également le fil de terre simplement enroulé autour de la phase et du neutre, ceci n'est pas très "propre". Même si cette installation n'est pas en opposition avec la norme, il conviendrait a minima de bien placer l'ampoule au plafond de manière à ne pas voir les fils. Cette mesure permettrait à l'utilisateur de ne jamais toucher un fil sous tension en souhaitant par exemple changer une ampoule.

Fig 14 : Une ampoule dont la masse est simplement enroulé autour des fils

Sur le tableau suivant, on observe les différentes sections de câbles requises selon les cas d'usage. On retiendra les sections de câbles du tableau, qui donnent des valeurs minorantes, car les sections de câbles réelles sont difficilement accessibles dans la maison. Les valeurs données dans le schéma unifilaire sont donc des valeurs théoriques.
On notera cependant que certains câbles pour l'éclairage étant à découvert, leur diamètre a pu être mesuré, hors tension bien évidemment. Une valeur de

$d = 3mm$ a été trouvée.

On en déduit $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 3^3}{4} = 7{,}7\ mm^2 > 1{,}5\ mm^2$ pour l'éclairage. Cette valeur peut cependant être faussée, car le câble a été mesuré avec gaine isolante. Connaissant la vraie section des câbles, il faudrait vérifier si la chute de tension entre l'origine de l'installation et tout point d'utilisation est inférieure à 3% pour les éclairages et 5% pour les autres récepteurs, condition exigée par la norme.

La norme impose également différents types de conducteurs suivant les circuits protégés.

	SECTION MINI FILS	INTENSITÉ MAXI DISJONCTEURS	CIRCUIT PROTÉGÉ
Circuits lumières			
Lumières	1,5 mm²	16 A	**8 points lumineux maxi** par circuit Au moins 2 circuits par logement (> 35 m²)
Circuits prises de courant			
Prises de courant avec terre	1,5 mm²	16 A	**8 prises maxi** par circuit
	2,5 mm²	20 A	**12 prises maxi** par circuit
Prises de courant avec terre dédiées cuisine[2]	2,5 mm²	20 A	**6 prises maxi**
Circuits spécialisés			
Volets roulants	1,5 mm²	16 A	**1 circuit** dédié pour l'ensemble des volets[3]
Chauffage électrique	2,5 mm²	20 A	**1 circuit** dédié par tranche de 4500 W
Lave-vaisselle, lave-linge, sèche-linge, four électrique, congélateur...	2,5 mm²	20 A	**1 circuit** dédié par appareil Au moins 3 circuits par logement
Plaques de cuisson	6 mm²	32 A	**1 circuit** dédié

Fig 15 : Choix des conducteurs en fonction du circuit protégé

D'après le schéma unifilaire de l'installation, donné en annexe 1, le nombre de lampes maximum supporté par un circuit est de cinq et il y a trois circuits lumières, la première ligne est donc respectée. Le nombre maximum de prises de courants est de 7 (< 8), pour l'étage 2, donc la deuxième ligne est également respectée. On continue ainsi pour chaque ligne du tableau.

Après vérification sur le Web, toutes les prises de la maison sont de type E (photo ci-dessous), donc reliées à la terre. Ceci assure une protection optimale des appareils et des personnes.

Toutes les conditions exigées par la norme n'ont bien sûr pas été vérifiées, car il faudrait plusieurs dizaines de pages (protection contre la foudre, dimensions du tableau électriques, hauteurs des prises, lumières…) pour tout vérifier rigoureusement. On peut cependant établir qu'en l'état actuel, la maison ne respecte pas la norme NF C 15-100.
Ceci n'est pas gênant dans la mesure où, comme rappelé au début, la norme ne s'applique que pour des logements neufs ou récemment rénovés (pas le cas de la maison).

Fig 16 : Caractéristiques de la prise E

III) Analyse de la consommation électrique

A) Démarche

Toutes les valeurs de tensions et courants donnés seront des valeurs efficaces uniquement.
Le circuit électrique est un montage parallèle de 33 dipôles.
On considère la tension aux bornes de chaque dipôle de $V = 230\,V \pm 10\,V$ à la fréquence de $f = 50\,Hz \pm 0{,}05\,Hz$.

Pour chaque dipôle récepteur, diverses informations ont pu être recueillies, par trois méthodes différentes : les informations constructrices, la mesure directe par Wattmètre et la mesure directe par compteur Linky.
Il faut noter que pour certains appareils, comme les ordinateurs portables, les valeurs sont approchées, car le temps de recharge de la batterie était inconnu. Dans ce cas précis, le calcul se base sur une approximation du temps de recharge journalier obtenue après discussion avec les utilisateurs (mes colocataires) et sur une valeur arbitraire du temps de recharge de la batterie de

1h. Prenons un exemple sous ces hypothèses : si le temps d'utilisation est de 3h, cela signifie que trois cycles de batteries de 1h chacun ont été effectués.

Le temps de fonctionnement journalier des appareils a été approximé en considérant le dernier mois (Mai) seulement. Ce temps de fonctionnement a été établi par expérience personnelle et par discussion avec mes colocataires. Pour certains appareils, comme la hotte aspirante, que nous n'utilisons que très rarement, un temps "symbolique" de 0,05h par jour (3 min) a été appliqué.

Il faut noter que tous les résultats numériques des puissances actives, réactives et apparentes, ainsi que les résultats de l'énergie consommée ont été arrondis à l'unité afin d'être cohérent vis à vis des incertitudes de mesures. En effet, ces incertitudes relatives sont de l'ordre de quelques pourcents et portent le plus souvent sur le chiffre des unités. Elles n'ont pas été calculées par souci de simplicité.

1) Les informations constructeurs

La puissance active de toute les lampes a pu être déterminée par lecture des informations constructeur. Par exemple, voici en photo la lampe LED de la chambre 3 ci-contre.
On peut y lire : $P_{LED} = 6W$

Fig 17 : Analyse des informations d'une ampoule LED

En guise d'autre exemple, pour le lave-linge, la notice du constructeur donnait les informations suivantes.

Nom du programme	Capacité nominale kg	Consommation d'énergie kWh/cycle			Durée du programme Heures : Minutes			Consommation d'eau Litres/Cycle			Max. Température °C			Teneur en humidité résiduelle % 1400 Rpm		
		Capacité nominale	1/2 charge	1/4 charge	Capacité nominale	1/2 charge	1/4 charge	Capacité nominale	1/2 charge	1/4 charge	Capacité nominale	1/2 charge	1/4 charge	Capacité nominale	1/2 charge	1/4 charge
Coton 90	7	2,33			03:00			80			81			62%		
Coton 60	7	0,98			04:10			52			43			62%		
Éco 40-60	7	1,08	0,49	0,32	03:25	02:42	02:40	49	40	40	44	29	20	62%	62%	62%
Synthétique / Vêtements de sport	3,5	0,54			01:50			44			42			71%		
Rapide 60	3	0,99			01:00			31			58			62%		
Coton 20	3,5	0,2			01:36			43			20			62%		

Fig 18 : Analyse de la notice du lave-linge

Comme cette notice annonce plusieurs valeurs différentes de puissances actives consommées par cycle, on prend le programme le plus utilisé dans mon cas et celui de mes colocataires. Il s'agit du programme "Eco 40-60", que l'on considère en capacité nominale. On en déduit la puissance active de chaque cycle.

$$E_{cycle} = 1{,}08\ kWh \Rightarrow P_{cycle} = \frac{E_{cycle}}{\Delta t_{cycle}} = \frac{1{,}08}{3 + \frac{25}{60}} = 0{,}316\ kW$$

On va supposer que 2,5 cycles sont effectués par semaine, car nous sommes cinq colocataires et nous effectuons environ un cycle chacun toutes les deux semaines. Ceci fait une utilisation journalière Uj de :

$$U_j = \frac{nb_{cycle/semaine} \times Durée_{cycle}}{nb_{jours/semaine}} = \frac{2{,}5 \times (3 + \frac{25}{60})}{7} = 1{,}22\ h$$

A titre de vérification, le Wattmètre a été branchée sur la machine à laver pendant deux semaines et il a affiché la valeur cumulée d'énergie consommée

de *5,58* kWh. En faisant le calcul avec les valeurs estimées précédentes, on trouve :

$$E_{2\ \ semaines} = 14 \times U_j \times E_{cycle} = 14 \times 1{,}22 \times 0{,}316 = 5{,}4\ kWh$$

L'approximation est donc plutôt cohérente avec la valeur expérimentale trouvée.

D'autres appareils dont la puissance active ne pouvait être calculée, comme la hotte aspirante, ont fait l'objet d'une recherche d'information sur le document du projet déposé sur Moodle.

2) Mesure directe par Wattmètre

Grâce à un Wattmètre numérique (en photo ci-dessous), comme vous l'avez compris, que je pouvais brancher sur chaque prise, le facteur de puissance, la puissance active, la tension et l'intensité de l'appareil utilisé pouvaient être déterminés d'une seule fois.
Cet appareil présentait l'avantage d'être assez précis. En effet $\Delta\ Wattmètre = \pm 2\%$
Il s'agit de la méthode la plus efficace car elle donne toutes les informations en une mesure et elle sera aussi considérée comme la plus fiable, car elle s'établit directement (sans établir de différence comme la méthode 3).

Fig 19 : Wattmètre utilisé pour les mesures

Ainsi, lorsque le choix se présentera entre deux méthodes, seule la mesure expérimentale par Wattmètre sera gardée.

3) Mesure indirecte par compteur Linky

Grâce à ce compteur, qui rend compte uniquement de la puissance apparente soutirée dans la maison, il était possible de déduire la puissance apparente d'un appareil en réalisant une différence de lecture. Par exemple, voici à gauche le

compteur Linky avant l'allumage du four et à droite le compteur après allumage du four.

On déduit immédiatement $S_{four} = 1350 - 208 = 1{,}142\ kVA$

Cette méthode, bien que très rapide, ne donne à elle seule pas toutes les informations sur le dipôle étudiée, comme la puissance active ou réactive. Il faut donc la coupler avec la méthode 1 afin d'obtenir toutes les informations.

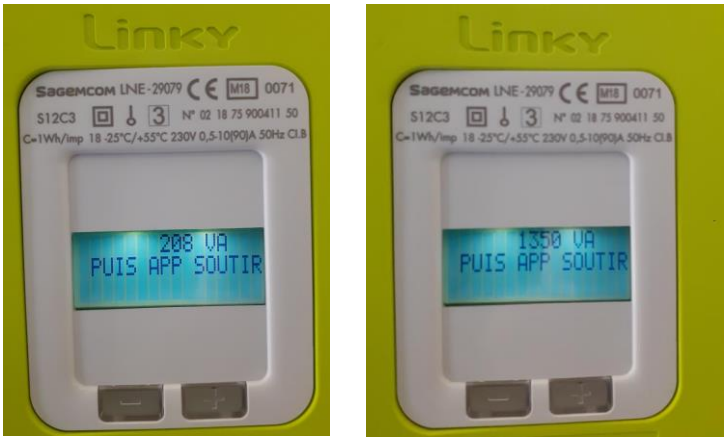


Fig 20 : Détermination de la puissance apparente d'un four grâce au compteur Linky

B) Méthode de Boucherot

1) Fonctionnement standard de l'installation

La méthode de Boucherot a été appliquée directement depuis le classeur Google Sheets où toutes les valeurs utiles au calcul ont été renseignées. Le nombre d'appareils est de 33 au total. Le tableau complet pièce par pièce donné en annexe 2 étant très grand, un tableau synthétique, par type d'appareil, est résumé ci-dessous, en réalisant des "groupes" d'appareils et en considérant uniquement les grandeurs "utiles" aux calculs. La consommation est étudiée pour une journée puis sur un mois.

	Groupes d'appareils	*Nombre*	*P (W)*	*Iexp (A)*	*FP*	*Q (VAR)*	*S (VA)*	*Utilisation jour (h)*	*Energie consommée (W.h.jour^-1)*
ECLAIRAGE	lampes fluocompactes	3	45	0,222	0,882	-24	51	1,33	60
	lampes incandescences	2	100	0,435	1	0	100	1,25	125
	lampes LED	12	76,5	0,347	0,958	-23	80	1,08	83
INFORMATIQUE	Aspirateur	1	765	3,3	0,98	155	781	0,05	38
	Ordinateurs	5	237	1,638	0,6	-293	377	1,28	303

	Box WIFI	1	8,5	0,077	0,48	-16	18	24	204
	Imprimante	1	4,6	0,050	0,4	-11	12	0,083	0
PETIT ELECTROMENAGER	Grille Pain	1	850	3,58	1	0	850	0,17	142
	Bouilloire	1	2050	8,91	1	0	2050	0,17	342
	Hotte aspirante	1	140	0,72	0,85	87	165	0,05	7
GROS ELECTROMENAGER	micro-ondes	1	1435	6,83	0,924	637	1570	0,17	239
	Frigidaire	1	80	0,55	0,630	99	127	24	1920
	Four	1	1142	4,97	1	0	1142	0,17	190
	Machine à laver	1	316	1,43	0,96	92	329	1,70	537
	Radiateur élec	1	2000	8,696	1	0	2000	0,05	100
	TOTAL	33	9250	41,7	0,997	704	9277		4290

Fig 21 : Tableau synthétique des appareils électroménagers de l'installation

La méthode de calcul va désormais être détaillée.
Suivant chacune des trois méthodes de détermination données dans la partie précédentes, des grandeurs ont pu être obtenues pour chaque appareil et renseignées dans le tableau, que ce soit la puissance apparente (S), la puissance active (P) ou le facteur de puissance (FP). A partir de deux de ces grandeurs, il était possible de déterminer les autres, en sachant au préalable si le dipôle était inductif ou capacitif. Les relations utilisées, dans un sens ou dans l'autre, sont les suivantes. On notera U_j le temps en heure d'utilisation journalier de l'appareil et E_j l'énergie consommée pour une journée.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \frac{P}{FP} = \frac{Q}{sin(acos(FP))} = V_{eff} \times I_{eff}$$

$$E_j = P \times U_j$$

A titre d'exemple, pour un aspirateur, on obtient grâce au Wattmètre :

$$P_{aspi} = 765\,W \text{ et } FP_{aspi} = 0{,}98 \Rightarrow S_{aspi} = \frac{P}{FP} = \frac{765}{0{,}98} = 781$$
$$\Rightarrow Q_{aspi} = S \times sin(acos(FP)) = 781 \times sin(acos(0{,}98))$$
$$= +155\,VAR\ (inductif)$$

$$\Rightarrow I_{eff\ aspi} = \frac{S}{V_{eff}} = \frac{781}{230} = 3{,}3\ A$$

Finalement on considère que l'aspirateur est utilisé une vingtaine de minutes par semaine, soit environ 3 minutes (0,05 h) par jour : $U_j = 0{,}05\ h.jour^{-1}$
On en déduit immédiatement : $E_j = P \times U_j = 765 \times 0{,}05 = 38\ W.h$

La méthode de Boucherot permet de déterminer les puissances totales, délivrées par le *réseau* (indicées par "r"), lorsque tous les appareils fonctionnent ensemble, par les formules suivantes :

$$\left.\begin{array}{l} P_r = \sum_{i=1}^{n} P_i \\ Q_r = \sum_{i=1}^{n} Q_i \end{array}\right\} \quad S_r = \sqrt{P_r^2 + Q_r^2}$$

On obtient une puissance active du réseau totale de $P_r = 9{,}25\ kW$, une puissance réactive du réseau totale de $Q_r = 0{,}752\ kVAR$ et une puissance apparente totale de $S_r = 9{,}28\ kVA > S_{contrat} = 6\ kVA$. Ainsi, si tous les appareils fonctionnent en même temps, des frais supplémentaires vont être causés par cette consommation hors contrat.
Le facteur de puissance total est de : $FP_r = \frac{P_r}{S_r} = \frac{9{,}25}{9{,}28} = 0{,}997 > FP_{min} = 0{,}93$
Ce facteur de puissance est donc acceptable pour EDF.
Toujours si tous ces appareils fonctionnaient simultanément, le courant total serait de : $I_{r\ eff} = \frac{S_r}{V_{r\ eff}} = \frac{9280}{230} = 41{,}7\ A > I_{disjonction} = 40\ A$
En effet, le disjoncteur différentiel général est de type "C40", cela signifie que le courant maximum qu'il peut supporter de manière continue sans se déclencher est de 40 A. Comme cette valeur est dépassée, il risque d'y avoir une coupure de courant.

L'énergie *totale* pour un fonctionnement *standard* consommée en kWh *journalièrement* E_{tsj} est obtenue en sommant les consommations de chaque appareil. On obtient, pour une journée standard environ :

$$E_{tsj} = \sum_{j=1}^{n} E_j = 4{,}29\ kWh$$

En considérant un prix d'abonnement journalier P_a fixe de 0,38 euros pour le mois de Mai (obtenue par un suivi de consommation en ligne) et un prix de

consommation du kWh P_c de 0,2 euros, on en déduit le coût *total standard journalier* C_{tsj} de l'installation, puis le *coût total standard mensuel* C_{tsm} pour le mois de Mai.

$$C_{tsj} = P_a + E_{tsj} \times P_c = 0{,}38 + 4{,}29 \times 0{,}2 = 1{,}24\,€\,.jour^{-1}$$
$$C_{tsm} = C_{tsj} \times 31 = 1{,}24 \times 31 = 38{,}44\,€\,.mois^{-1}$$

Ces coûts sont bien sûr des coûts moyens pour un fonctionnement standard de l'installation.

Grâce à excel, le diagramme en camembert de l'énergie électrique consommé par catégorie d'appareil est représenté ci-dessous.

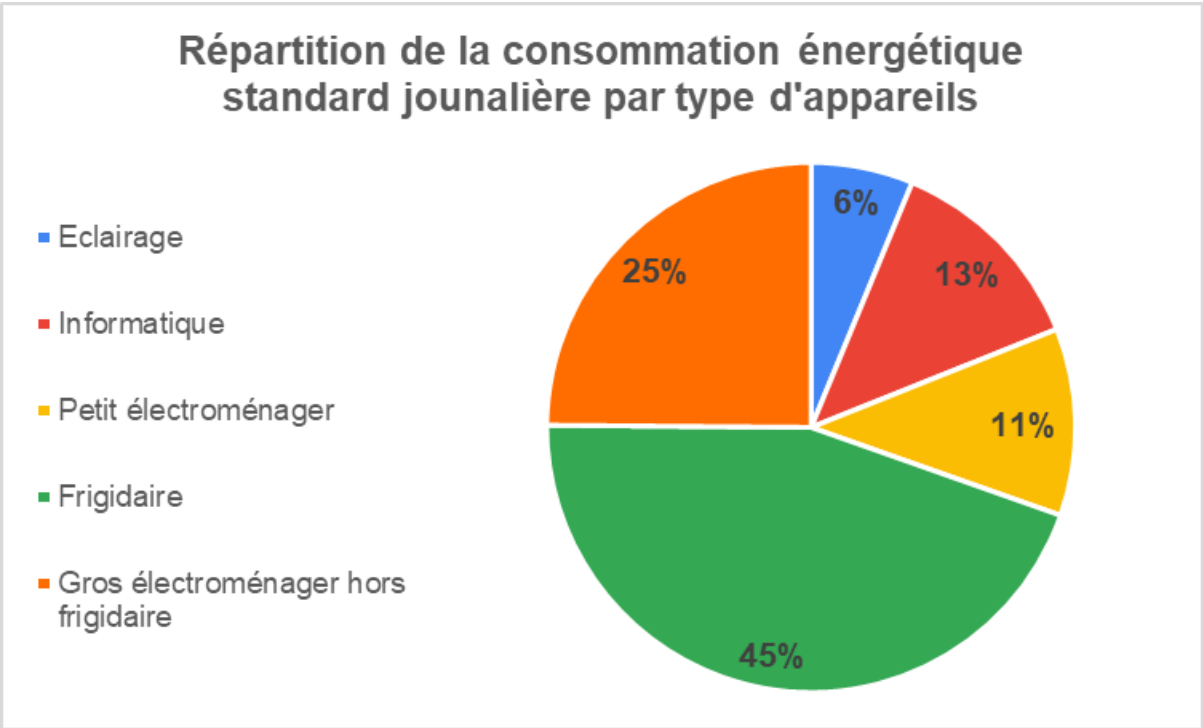


Fig 22: Diagramme camembert de la répartition énergétique journalière consommée par catégorie d'appareils en fonctionnement standard

On s'aperçoit de la part importante qu'occupe le gros électroménager tout compris, à savoir *45% + 25% = 70%* de toute l'énergie consommée chaque jour. Le frigidaire/congélateur occupe 45% de toute l'énergie consommée, ce qui en fait le plus gros consommateur d'énergie électrique de la maison.

Finalement, le coût de revient *mensuel spécifique* de chacun des i appareils pour un fonctionnement *standard* C_{ssm} peut être calculé comme suit pour le mois de Mai :

$$C_{ssm} = P_c \times E_{ssj} \times 31$$

Par exemple, pour la bouilloire, on obtient :
$E_{ssj} = 0{,}342\ kW.h.jour^{-1} \Rightarrow C_{ssm\ bouilloire} = 0{,}2 \times 0{,}342 \times 31 = 2{,}12\ €$

L'ensemble des coûts calculés pour chacun des appareils est résumé dans le tableau suivant.

	Groupes d'appareils	***Coût mensuel (€.mois^-1)***
ECLAIRAGE	lampes fluocompactes	0,4
	lampes incandescences	0,8
	lampes LED	0,5
INFORMATIQUE	Aspirateur	0,2
	Ordinateurs	1,9
	Box WIFI	1,3
	Imprimante	0,0
PETIT ELECTROMENAGER	Grille Pain	0,9
	Bouilloire	2,1
	Hotte aspirante	0,0
GROS ELECTROMENAGER	micro-ondes	1,5
	Frigidaire	11,9
	Four	1,2
	Machine à laver	3,3
	Radiateur élec	0,6
	TOTAL	26,6

Fig 23 : Tableau synthétique du coût mensuel de chaque appareil par catégorie en fonctionnement standard de l'installation

Bien sûr, le total du tableau ne représente pas le vrai coût total car il ne tient pas compte du coût de l'abonnement. Pour plus de confort visuel, voici la répartition des coûts par type d'appareil sous forme de diagramme en barre.

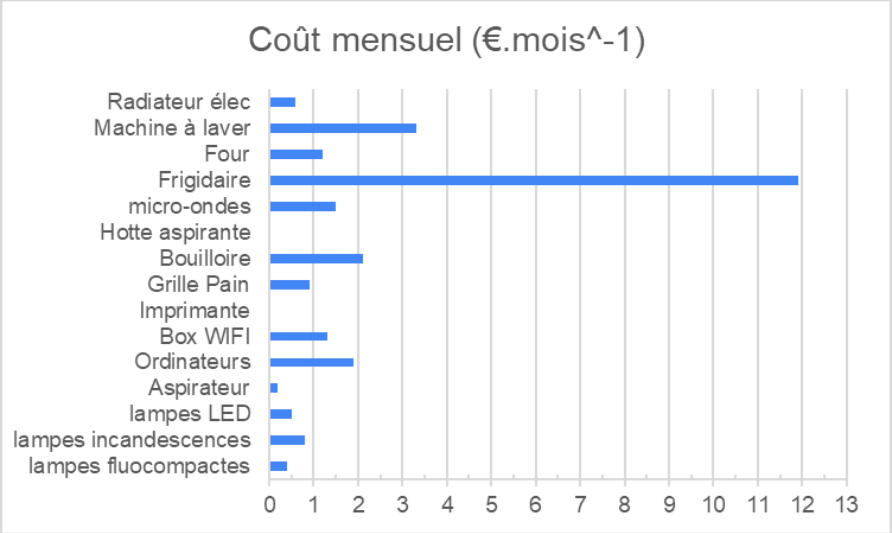


Fig 24 : Coût mensuel de l'installation par appareil en fonctionnement standard de l'installation

Après le frigidaire-congélateur, la machine à laver et la bouilloire sont donc les plus gros consommateurs d'énergie.

2) Fonctionnement minimal de l'installation

Pour un type de fonctionnement *minimal*, on considère que seul le frigidaire associé au congélateur est en marche. On a alors, toujours d'après le tableau ci-dessus :

$$E_{tmj} = E_{frigidaire} = 1{,}92\ kWh\,.jour^{-1}$$

$$\Rightarrow C_{mj} = P_a + E_{tmj} \times P_c = 0{,}38 + 1{,}92 \times 0{,}2 = 0{,}76\ €\,.jour^{-1}$$

$$\Rightarrow C_{ms} = C_{mj} \times 31 = 0{,}76 \times 31 = 23{,}6\ €\,.mois^{-1}$$

On constate que le prix journalier et mensuel en consommation minimal est assez élevé par rapport à la consommation standard. C'est tout simplement parce que le frigidaire est l'appareil représentant la plus grosse consommation d'énergie électrique du logement. Comme trouvé précédemment, la part d'énergie consommée par celui-ci est de $\frac{1{,}92}{4{,}29} = 45\%$!

La comparaison entre appareils permanents et appareils amovibles n'a pas été réalisée car seul le frigidaire-congélateur fonctionne en permanence, avec le WIFI, mais celui-ci représente une part très négligeable de la puissance totale (quelques Watts).

C) Méthode du graphe linéaire orienté et Tellegen

1. Simulation du circuit

Afin de modéliser le circuit, une extension[2] Google Doc a été utilisée. Celle-ci permet non seulement de réaliser le schéma électrique simplifié de l'installation, mais également de le simuler. A partir des résultats obtenus par la méthode de Boucherot précédemment, les valeurs des résistances et réactances (définies par des bobines ou condensateurs sur le circuit) ont directement été rentrées. Afin de vous permettre de réaliser la simulation, le fichier texte de la simulation, à mettre dans un bloc note, est donné en annexe 3. Il suffit ensuite de se rendre sur la page https://thumbsdb.herokuapp.com/circuit/ puis dans l'onglet « File » d'ouvrir le fichier note. Le circuit se charge alors tout seul.

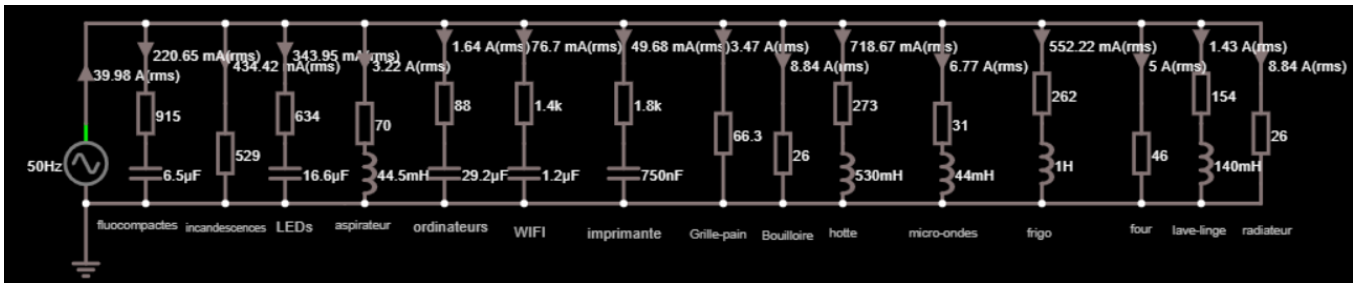


Fig 25 : Schéma électrique simplifié de l'installation

Le circuit électrique a été tracé pour les quinze appareils du tableau simplifié (Figure 21) et une tension de réseau de 230V.
Le sens de courant est défini selon le sens des flèches grises, qui correspondent à des ampèremètres sur le circuit. Les résistances et valeurs des capacités et inductances ont été définies à partir du tableau figure 28 (ci-dessous). Les valeurs des résistances correspondent simplement à la lecture graphique du tableau, tandis que les valeurs des capacités et inductances définies sur le schéma électrique s'obtiennent de la façon suivante :

[2] Ce module est disponible ici : https://thumbsdb.herokuapp.com/circuit/ normalement (il faut sinon aller dans les extensions de Google Doc et le télécharger gratuitement) en accès libre. Il présente de nombreux avantages pédagogiques et est très simple à utiliser.

$$C = \frac{1}{\omega X} = \frac{1}{2\pi f X}$$

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2\pi f}$$

Avec « X » la valeur de la réactance définit dans le tableau (fig 28), « f » la fréquence du réseau en Hz. Une simple simulation de la tension du réseau en fonction du courant total a pu être effectuée ci-dessous.

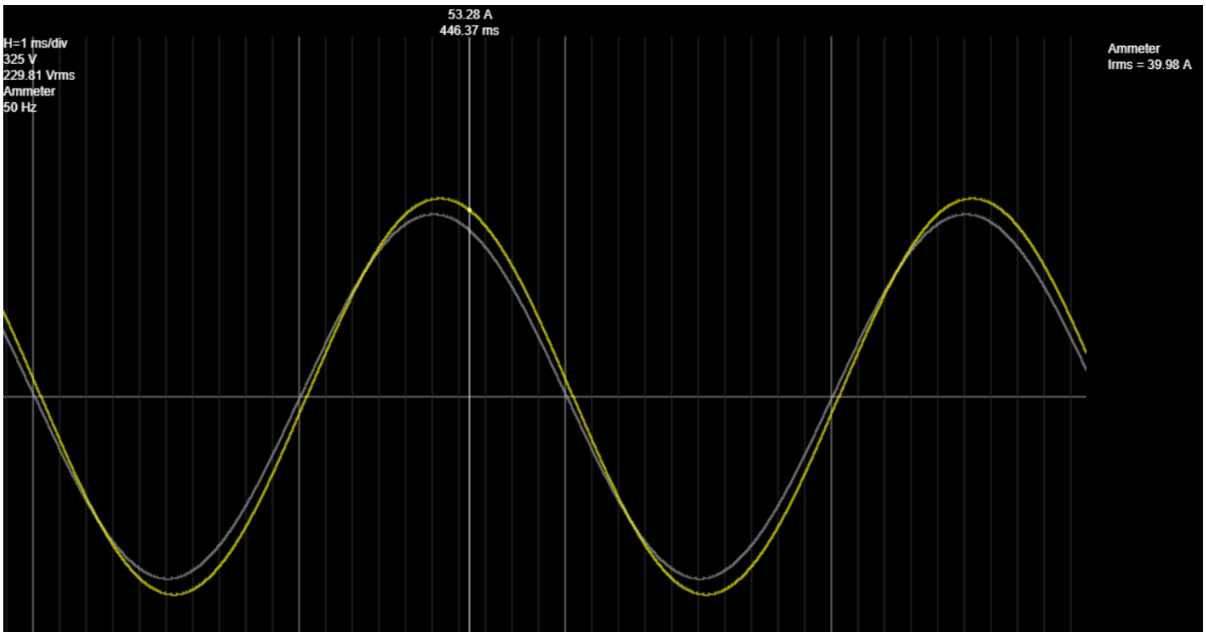


Fig 26 : Courant (en jaune) et tension (en gris) en fonction du temps pour le tableau simplifié (Fig 21) de l'installation.

On trouve un courant total de 39,98 A (en haut à droite Fig 26), proche du courant total obtenu par la méthode de Boucherot, mais inférieur. Ceci peut être expliqué par une tension mesurée à 238 V environ (voir figure 19) et non 230 V (valeur de simulation) dans l'habitation. Ainsi, en mettant une tension plus élevée dans la simulation, on retrouverait le même résultat, aux incertitudes de calcul prêt. On voit aussi sur le graphique le faible déphasage courant/tension, témoignant d'un facteur de puissance très proche de 1, conformément à celui trouvé par la méthode de Boucherot (0,997). De plus, toutes les valeurs des courants efficaces définies Figure 25 sont bien conformes avec ce qui a été obtenue par la méthode de Boucherot. Par exemple, prenons le four, un courant efficace de 4,97 A y a été trouvé (tableau fig. 21) et « expérimentalement », nous obtenons 5A. Il faut cependant noter qu'il est normal de retrouver les mêmes valeurs, car les valeurs des impédances entrées dans la simulation ont été obtenues en connaissance de cause du courant y circulant (...).

Il se trouve que ce module se base, pour le calcul des courants, sur la méthode de calcul automatisée offerte par la topologie de graphes linéaires orientés. Maintenant que nous avons introduit le circuit, passons à l'application de cette méthode des graphes linéaires orientés.

2. Application de la méthode

Le calcul via Python a été effectué pour les 33 appareils. Cependant, afin de ne pas surcharger la page, celui-ci a été tracé, comme pour la simulation, pour le tableau simplifié (Fig 21) des quinze appareils appartenant aux catégories Éclairage, Informatique, Gros électroménager et Petit Électroménager. On aboutit au graphe linéaire orienté suivant. On définit le potentiel du nœud 1 arbitrairement à 0.

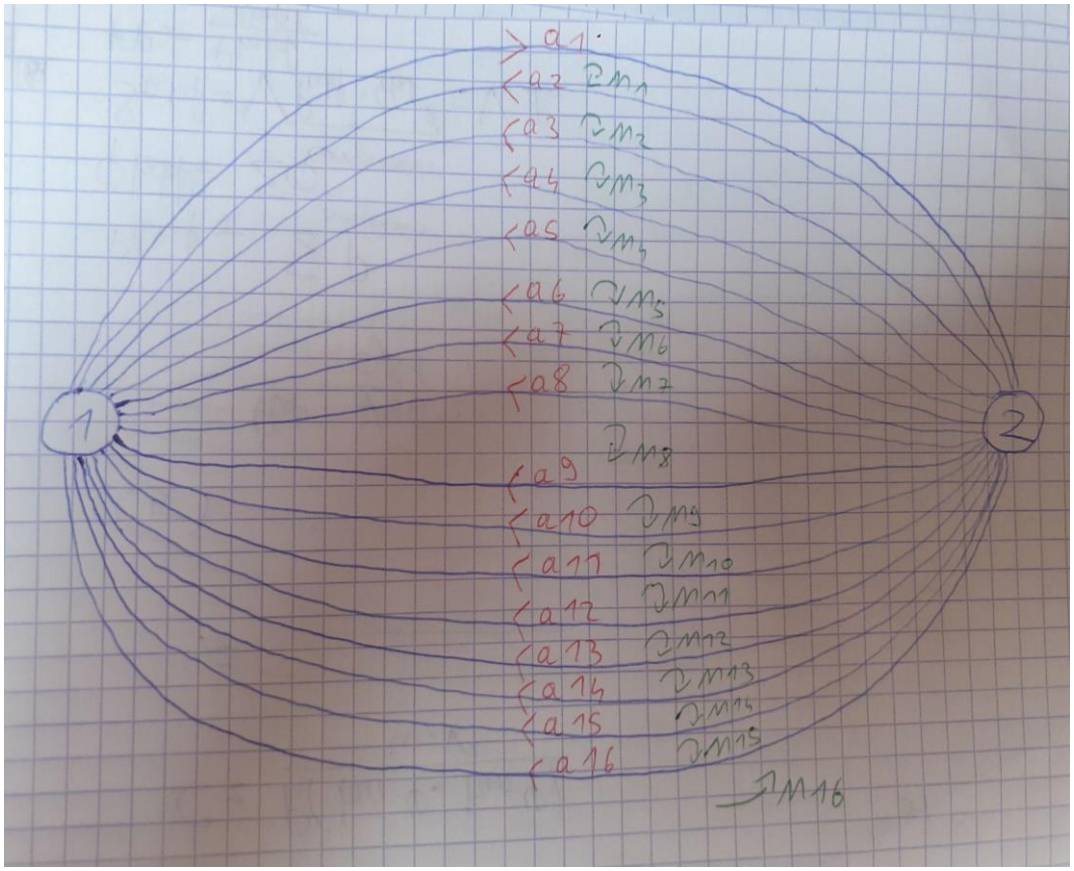


Fig 27 : Graphe linéaire orienté de l'installation simplifiée

Ce graphe est simple, dans le sens où il présente que deux nœuds, tous les appareils étant branchés en parallèle sur le réseau (afin de garantir l'autonomie des autres en cas de panne). Il y a une arête par groupe de dipôle du tableau *Fig 21* considéré, soit seize arêtes. On déduit les paramètres du graphe :

$$Rang : \rho = n_s - 1 = 2 - 1 = 1$$
$$Nullité : \nu = n_a - (n_s - 1) = 16 - 1 = 15$$

Il est bien plus avantageux d'utiliser la méthode des potentiels aux nœuds, sachant qu'il y a quinze fois plus de branches que de nœuds. Ainsi, utiliser la méthode des potentiels aux nœuds nécessite de résoudre qu'une seule équation à une inconnue alors que la méthode des courants de mailles nécessite de résoudre quatorze équations à 14 inconnues. En revanche, une branche comporte une source de tension seule : afin d'utiliser tout de même la méthode des potentiels au nœuds, il sera nécessaire plus tard d'utiliser l'"astuce" de la petite résistance en série de la source de tension.
La matrice d'incidence étendue est :

$$A_e = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice d'incidence s'obtient en définissant le potentiel du noeud 1 à 0, on retire donc la première ligne :

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice des mailles étendue est donnée ci-dessous :

$$M_e = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

On retire la dernière ligne pour obtenir la matrice des mailles.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

On définit ensuite pour chacune des quinze arêtes un composant générique complexe comme ci-contre

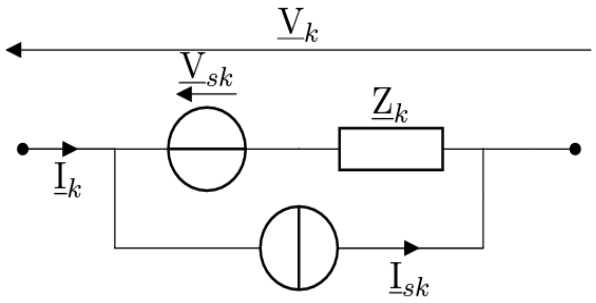


Fig 26 : Composant générique récepteur complexe

Hormis la tension E (=230V) du réseau présente seule dans une branche, il n'y a pas de sources de courants dans les branches. Le vecteur Is est donc constitué d'une colonne avec seize lignes remplies de 0. Par soucis de place, ces vecteurs sont représentés en ligne ci-dessous.

$$Vs = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$Is = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Comme il y a une tension seule dans une branche, cela va conduire l'admittance Y à exploser dans la résolution du système linéaire. Pour cette raison, on introduit arbitrairement une petite impédance $R = 0{,}01\,\Omega$ en série avec la source de tension. Toujours grâce au tableau simplifié, les valeurs des impédances Z_k et admittances Y_k ont pu être calculées.

	Groupes d'appareils	Résistance (Ω)	Réactance (Ω)	Impédance complexe (Ω)	Admittance complexe (Ω)
ECLAIRAGE	lampes fluocompactes	915	-488	915,22491349481-488,119953863899i	0,000850661625708885+0,00058273193685343 2i
	lampes incandescences	529	0	529	0,00189035916824197
	lampes LED	634	-191	634,178256611166-190,667972575906i	0,0014461247637051+0,00047407901712641i
INFORMATIQUE	Aspirateur	70	14	70,2479338842975+14,264 4513668515i	0,0136715764705882-0,00288825860878766i
	Ordinateurs	88	-109	88,2796546916588-109,138982382515i	0,00448015122873346+0,013997026960638i
	Box WIFI	1434	-2621	1433,90117647059-2620,65899373516i	0,000160680529300567+0,0012745921111484i
	Imprimante	1840	-4216	1840-4215,96963935937i	0,000086956521739130 4+0,0012452636632516 3i
PETIT ELECTROMENAGER	Grille Pain	66	0	66,3212758652976	0,0150781176470588
	Bouilloire	26	0	25,8048780487805	0,0387523629489603
	Hotte aspirante	273	169	272,515151515152+168,88 9722280579i	0,00265122873345936-0,00227404221885373i
GROS ELECTROMENAGER	micro-ondes	31	14	30,7969897358919+13,669 2752785943i	0,0271266540642722-0,0143516295807253i
	Frigidaire	262	324	262,450125+323,51982480 79i	0,00151228733459357-0,00469658418372534i
	Four	46	0	46,3222416812609	0,0215879017013233
	Machine à laver	154	45	154,280506329114+44,998 4810126582i	0,00597353497164462-0,00189017826898088i
	Radiateur élec	26	0	26,45	0,0378071833648393
	TOTAL	6396	-7059	6395,77310332802-7059,21378717027i	0,000070485838358548 4+0,0001725719456547 46i

Fig 28 : Tableau des impédances et admittances complexes par appareils

Les résistances et réactances ont été calculées comme suit :

$$\left.\begin{array}{l} R = \frac{P}{I^2} \\ X = \frac{Q}{I^2} \end{array}\right\} \quad \underline{Z} = R + jX$$

La puissance complexe a été calculée par la fonction $COMPLEX(Re; Im)$ de Google Sheet prenant en paramètre la partie Réelle, R et la partie imaginaire, X. Finalement, comme Google Sheet ne permet pas d'inverser un nombre complexe directement, la formule suivante à été utilisée :

$$Y = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2}$$

A partir de ces données, la matrice d'admittance de dimensions 15×15 a été calculée.

Passons désormais au calcul des courants et puissances dans les différents dipôles grâce à la méthode des potentiels aux nœuds. Afin d'appliquer cette méthode malgré la présence d'une source de tension seule dans une branche, une petite résistance de $0{,}01\ \Omega$ a été mise en série de la source de tension.

Afin de réaliser les calculs, le programme Python déposé sur Moodle a été repris, adapté et commenté. Celui-ci est disponible en annexe 4 ainsi que les résultats commentés en annexe 5.

Les résultats obtenus par la méthode des graphes linéaires orientées sont cohérents avec ceux obtenus par Boucherot et par la simulation.

IV) Comparaison à la consommation réelle et perspectives d'amélioration

A) Comparaison à la consommation réelle

Enedis et GRDF, en partenariat avec le Ministère de la Transition écologique, et l'ADEME se sont associés pour lancer le « Energy Data Challenge »[3] permettant de récompenser les services les plus innovants en termes de données de consommation et de production d'énergie fournies aux consommateurs.
Dans ce cadre, deux services de visualisation de données ont été utilisés.

1) Le service du distributeur Enedis directement
2) Le service HelloWatt

Grâce au numéro de Point de livraison d'électricité (PRM) donné sur le compteur Linky ou une facture, il a été possible d'avoir les données de consommation de la maison en temps réel.
La consommation suivie pour le mois de Mai est représentée ci-dessous.

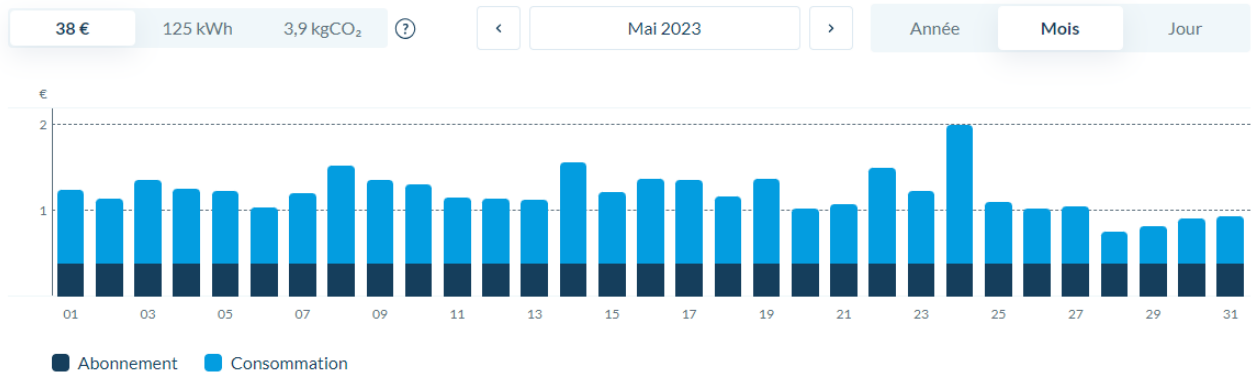


Fig 29 : Consommation électrique de la maison pour le mois de Mai

On calcule l'énergie moyenne journalière consommée par jour sur le mois de Mai :

$$\bar{E}_{Mai\ th} = \frac{125}{31} = 4{,}03\ kWh$$

Cette valeur est à comparer avec la valeur trouvée par la méthode de Boucherot

[3] Ce challenge est détaillé sur cette page : https://energiedatachallenge.fr/

$$\bar{E}_{Mai\ exp} = 4{,}29\ kWh$$

L'écart relatif est donc de $E_r = \frac{|\bar{E}_{Mai\ th} - \bar{E}_{Mai\ exp}|}{\bar{E}_{Mai\ th}} = 6{,}5\ \%$.

Cet écart est cohérent avec les incertitudes de mesure, notamment sur les temps d'utilisation, qui ont dû être approximés et résultent uniquement de discussions avec mes colocataires. Vu le nombre d'appareils de l'installation, on peut dire avoir tout de même trouvé une valeur cohérente d'énergie consommée.

Le prix de l'électricité payé à cinq pour le mois de Mai (38 euros) est plus que raisonnable et on peut dire que nous ne sommes pas de très grands consommateurs. En effet, la consommation moyenne par colocataire est de 25 kWh (125/5 car nous sommes 5), or la consommation moyenne d'un français est de 185 kWh par mois !
Finalement, HelloWatt affiche aussi les émissions approximatives de CO2 sur le mois de Mai. Elles sont de 3,9 kg environ ce qui correspond à un trajet de 1645 km en TGV d'après le site. En ramenant ces émissions par personne, on obtient 3,9/5 soit 0,78kg CO2 par mois par personne, ce qui est très faible ! A titre de comparaison, un humain rejette en respirant entre 0,7 et 0,9kg de CO2 chaque jour.
Le contrat souscrit $S = 6kVA$ paraît parfaitement adapté à nos besoins, car cette valeur n'a jamais été dépassée d'après Enedis. En effet, la valeur la plus haute mesurée serait de 5,2 kVA, valeur atteinte le 28 Février, sans doute à cause du radiateur électrique en marche (Hiver).

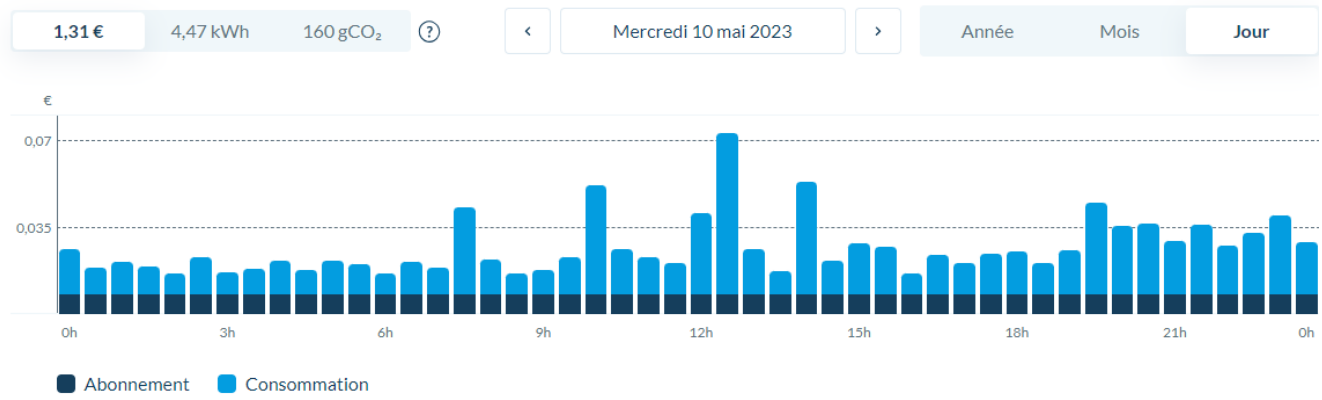


Fig 30 : Consommation électrique pour la journée du Mercredi 10 Mai 2023

En analysant le profil type de consommation sur une journée, on obtient naturellement un pic de consommation vers midi, du fait de l'utilisation

des appareils électriques en cuisine, comme la bouilloire, le micro-ondes ou le four et également en soirée, car non seulement tous les étudiants rentrent de cours et branchent leur ordinateur, mais le repas surtout sollicite les mêmes appareils que le midi.

En analysant une journée où nous étions tous en vacances, il est possible de trouver la consommation du seul appareil permanent : le frigidaire-congélateur, a fortiori aussi le plus gros consommateur d'énergie de la maison.

On trouve, toujours grâce à HelloWatt, une consommation journalière de 2,4 kWh lorsque le frigidaire fonctionne seul. La valeur trouvée dans le tableau 21 était de 1,92 kWh. La valeur a donc été sous-estimée.

B) Perspectives d'améliorations

Il aurait été intéressant, avec plus de temps, d'établir les différentes incertitudes sur les mesures des puissances et énergies. Ainsi, on aurait pu voir à quel point les résultats obtenus en termes de consommation énergétique et de temps d'utilisation des appareils sont cohérents avec la réalité.

Par ailleurs, avoir les données de consommation de l'année précédente (anciens colocataires) sur le site d'Enedis aurait permis de les comparer avec les valeurs actuelles.

Le frigidaire-congélateur est l'appareil consommant le plus dans la maison. Il serait intéressant donc, à terme, de passer à un appareil très basse consommation (label A+).

Conclusion

Ce projet m’a permis d'appliquer les connaissances théoriques à un cas concret, me familiarisant ainsi avec les différents aspects de la protection et de la distribution dans les réseaux domestiques. Désormais, je sais appliquer des méthodes quasi-systématiques pour l’étude des installations domestiques. Les méthodes ne doivent pas être appliquées indépendamment. La méthode de Boucherot, très pratique et facile à mettre en place, doit être combinée avec la méthode automatique des graphes linéaires, afin de bénéficier de leurs avantages respectifs.

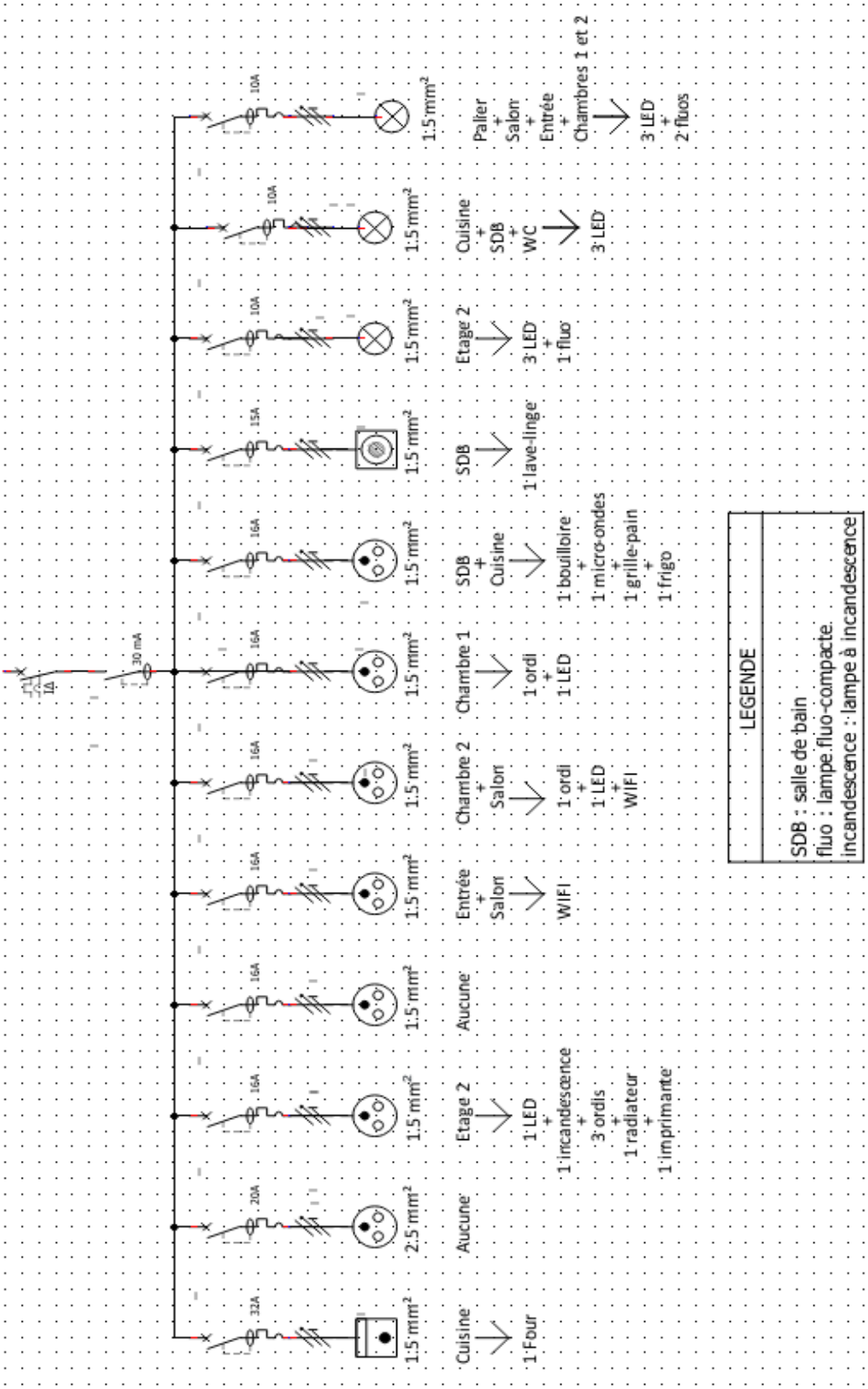
De plus, afin de réduire sa consommation énergétique, il est nécessaire de savoir où agir. Ce projet donne des clés essentielles pour identifier les appareils les plus coûteux et devenir un consommateur responsable.

Finalement, d’un point de vue sécurité, ce projet m’a permis de comprendre à quel point la norme NF C 15-100 pouvait être contraignante et difficile à vérifier pour une simple installation domestique, mais à quel point elle était essentielle pour garantir la sécurité des biens et des personnes.

La prochaine étape est d’étudier une installation électrique industrielle, fonctionnant généralement en triphasé, qui permettrait d’intégrer pleinement les bases de l’électro-technique.

V) Annexes

A1 : Schéma unifilaire de l'installation (Q-electrotech)



A2 : Bilan global des appareils

	Appareil	P th (W)	P exp (W)	Iexp (A)	FP Exp	Q (VAR)	S (VA)	Utilisation jour (h)	Energie consommée (W.h) par jour	Imax
Entrée + Couloirs + Salon	lampe fluocompacte	15	NC	0,074	0,882	-8	17	0,5	8	0,11
	lampe fluocompacte	15	NC	0,074	0,882	-8	17	0,5	8	0,11
	lampe entrée incandescence	60	NC	0,261	1	0	60	0,08	5	NC
	lampe LED entrée	5,3	NC	0,024	0,95	-2	6	0,5	3	0,03
	aspirateur	750	765	3,3	0,98	155	781	0,05	38	NC
	lampe LED salon	8,6	NC	0,039	0,95	-3	9	0,1	1	0,082
	lampe LED escalier	4,5	NC	0,021	0,95	-1	5	0,08	0	0,04
	Box WIFI	6,9	8,5	0,077	0,48	-16	18	24	204	NC
Cuisine	micro-ondes	1450	1435	6,83	0,924	637	1570	0,17	239	NC
	Frigidaire	NC	80	0,55	0,630	99	127	24	1920	NC
	Grille Pain	800	850	3,58	1	0	850	0,17	142	NC
	Bouilloire	2000	2050	8,91	1	0	2050	0,17	342	NC
	Four	NC	1142	4,97	1	0	1142	0,17	190	NC
	Hotte aspirante	NC	140	0,72	0,85	87	165	0,05	7	NC
	lampe LED	11	NC	0,05	0,95	-4	12	1	11	83mA
Salle de bain	lampe LED	5,5	NC	0,03	0,95	-2	6	0,5	3	47mA
	lampe LED	11	NC	0,025	0,95	-2	6	0,5	6	95mA
	Machine à laver	2100	316	1,43	0,96	92	329	1,7	537	NC
Chambres	lampe LED 1	4,5	NC	0,021	0,95	-1	5	1	5	40mA
	lampe LED bureau 1	4,5	NC	0,021	0,95	-1	5	1	5	40mA
	lampe LED 4	8,9	NC	0,041	0,95	-3	9	3	27	50mA
	lampe LED 2	4,5	NC	0,021	0,95	-1	5	1	5	40mA
	Radiateur élec 5	2000	NC	8,696	1	0	2000	0,05	100	NC
	Imprimante 5	NC	4,6	0,050	0,4	-11	12	0,08	0	NC
	lampe Fluo-compacte 5	15	NC	0,074	0,882	-8	17	3	45	NC
	PC 1	NC	30	0,247	0,5	-52	60	1	30	NC
	PC 2	65	27	0,230	0,5	-47	54	2	54	NC
	PC 3	NC	40	0,348	0,5	-69	80	3	120	NC
	PC 4	65	27	0,230	0,5	-47	54	2	54	NC
	PC 5	NC	45	0,361	0,5	-78	90	1	45	NC
	lampe Incandescence 3	40	NC	0,174	1	0	40	3	120	NC
	lampe LED 3	6	NC	0,027	0,95	-2	6	3	18	50mA
	lampe LED 3	2,2	NC	0,010	0,95	-1	2	0,5	1	20mA
	TOUS LES APPAREILS	**9182**		**41,5**	**0,997**	**704**	**9209**		**4290**	

A3 : Code Simulation[4]

```
$ 1 0.000004999999999999996 10.20027730826997 50 5 43
v 48 352 48 288 0 1 50 325 0 0 0.5
w 48 208 96 208 0
w 48 352 96 352 0
g 48 352 48 400 0
r 96 256 96 304 0 915
c 96 304 96 352 0 0.0000065 11.360950672489698
r 160 272 160 352 0 529
r 208 256 208 304 0 634
c 208 304 208 352 0 0.0000166 -10.228408305360361
r 272 272 272 304 0 70
l 272 304 272 352 0 0.0445 3.7188456084032557
r 336 240 336 304 0 88
c 336 304 336 352 0 0.000029199999999999998 115.38582856307848
r 400 240 400 304 0 1434
c 400 304 400 352 0 0.000001209999999999998 173.57517748498785
r 480 240 480 304 0 1840
c 480 304 480 352 0 7.5e-7 201.91473316830957
r 560 240 560 352 0 66.3
r 608 272 608 352 0 26
r 656 240 656 304 0 273
w 96 208 160 208 0
w 160 208 208 208 0
w 208 208 272 208 0
w 96 352 160 352 0
w 160 352 208 352 0
w 208 352 256 352 0
w 256 352 272 352 0
w 272 208 336 208 0
w 272 352 336 352 0
w 336 208 400 208 0
w 400 208 480 208 0
w 480 208 560 208 0
w 560 208 608 208 0
w 608 208 656 208 0
w 336 352 400 352 0
w 400 352 480 352 0
w 480 352 560 352 0
w 560 352 608 352 0
w 608 352 656 352 0
r 736 272 736 304 0 31
w 656 208 736 208 0
w 656 352 736 352 0
l 656 304 656 352 0 0.53 0.578309487034596
l 736 304 736 352 0 0.044 6.410429826634716
r 816 240 816 288 0 262
l 816 288 816 352 0 1.03 0.20278222560847028
w 736 352 816 352 0
w 736 208 816 208 0
r 896 272 896 352 0 46
r 944 240 944 288 0 154
r 992 256 992 336 0 26
l 944 288 944 352 0 0.14 1.557241157701037
w 816 208 896 208 0
w 896 208 944 208 0
w 944 208 992 208 0
w 944 352 896 352 0
w 816 352 896 352 0
w 944 352 992 352 0
w 992 336 992 352 0
w 992 224 992 208 0
x 57 373 121 376 4 10 fluocompactes
x 128 375 192 378 4 9 incandescences
x 201 375 230 378 4 12 LEDs
x 248 373 292 376 4 10 aspirateur
x 311 375 371 378 4 12 ordinateurs
x 392 379 417 382 4 12 WIFI
x 451 380 510 383 4 12 imprimante
x 533 380 578 383 4 10 Grille-pain
x 591 381 632 384 4 10 Bouilloire
x 645 379 667 382 4 10 hotte
x 709 379 764 382 4 10 micro-ondes
x 804 379 823 382 4 10 frigo
x 921 377 963 380 4 10 lave-linge
x 887 376 904 379 4 10 four
x 977 377 1016 380 4 10 radiateur
370 48 288 48 208 1 1
370 992 224 992 256 1 1
370 944 208 944 240 1 1
370 896 208 896 272 1 1
370 816 208 816 240 1 1
370 160 208 160 272 1 1
370 208 208 208 256 1 1
370 96 208 96 256 1 1
370 272 208 272 272 1 1
370 336 208 336 240 1 1
370 400 208 400 240 1 1
370 480 208 480 240 1 1
370 560 208 560 240 1 1
370 608 208 608 272 1 1
370 656 208 656 240 1 1
370 736 208 736 272 1 1
x 18 179 1085 182 4 24 0,222\s;\s0,435\s;\s0,347\s;\s3,3\s;\s1,638\s;\s\s0,077\s;\s0,050\s;\s3,58\s;\s8,91\s;\s0,72\s;\s6,83\s;\s0,55\s;\s4,97\s;\s1,43\s;\s8,696
x 8 138 1091 141 4 24 Valeurs\sthéoriques\sdes\scourants\strouvés\sdans\sle\stableau,\sdans\sl'ordre\s(à\scomparer\savec\sla\ssimulation):
o 76 8 0 20487 640 12.8 0 2 76 3
```

[4] *(à copier-coller sur https://thumbsdb.herokuapp.com/circuit/)*

A4 : Programme Python Utilisé

```
#----- Initialisation -----

import numpy as np  #Importation du module de calcul scientifique numpy utile pour les calculs d'algèbre linéaire

texte_a_afficher = " Mini-projet : Calcul d'une installation électrique domestique "
#Affichage du titre du programme
print ( (len(texte_a_afficher) + 3)*"*"+ "\n"+ 2*"*" + texte_a_afficher + 2*"*" \
+ "\n" + (len(texte_a_afficher) + 3)*"*")

#----- Paramètres du réseau-----

E = 230     #Il s'agit de la tension de la source
#----- Equations d interconnexion-----

A = np.ones((1,16))*(1) #Calcul de la matrice d'incidence réduite (partie IIIc) : une matrice de taille 16 lignes et 1 colonne est remplie automatiquement
A[0,0]=-1   #Le premier coefficient est négatif dû à la présence de la source de tension

rho = np.linalg.matrix_rank(A)  #Calcul du rang de la matrice A : nombre de lois des noeuds indépendantes (=1 ici)
print( "\nMatrice d'incidence reduite A = \n", A, "\n de rang rho = ", rho) #Affichage de la matrice calculée
M = np.array([[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],     #Entrée de la matrice des mailles réduite (partie IIIc)
              [0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0],
              [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1]])
nu = np.linalg.matrix_rank(M)       #Rang de la matrice des mailles :  nombre de lois des mailles indépendantes (=15 ici)
print ("\nMatrice des mailles reduite M : \n", M, "\n de rang nu = ", nu) # Affichage de la matrice des mailles réduite
print ("\nVerification du theoreme de Tellegen : A*M.T = \n", A.dot(M.T))  # Le produit scalaire des vecteurs tensions/courants doit être nul, c'est l'équivalent matriciel ici

# ----- Equations constitutives -----

Vs = np.zeros((16,1),dtype = complex) #On définit le vecteur des tensions sources comme une colonne à 16 lignes remplies de 0.
Vs[0,0]=-E   # Le premier coefficient vaut cependant la tension de la source (non nul)
```

```
Is = np.zeros((16,1),dtype = complex)    # Il n'y a pas de générateur de courant donc on
définit un vecteur à 16 lignes remplies de 0

#La matrice d'impédance est définie par un vecteur ci-dessous
Z_temp = np.array([0.001,915.22491349481-488.119953863899j,529,634.178256611166-
190.667972575906j,70.2479338842975+14.2644513668515j,88.2796546916588-
109.138982382515j,1433.90117647059-2620.65899373516j,1840-
4215.96963935937j,66.212758652976,25.8048780487805,272.515151515152+168.889722280579j,30.79698
97358919+13.6692752785943j,262.450125+323.5198248079j,46.3222416812609,154.280506329114+44.998
4810126582j,26.45], dtype = complex)
Z = np.diagflat(Z_temp) #Ce vecteur est transformé en matrice diagonale par cette fonction.
Y_temp = [1/r for r in Z_temp] #Chaque coefficient du vecteur Z_temp est inversé pour obtenir
la matrice d'admittance.
Y = np.diagflat(Y_temp) #Similairement, le vecteur Y_temp est transformé en matrice diagonale
```

 # ----- Methode des potentiels aux nœuds -----

```
Upsilon = np.linalg.solve(A.dot(Y).dot(A.T), A.dot(Y).dot(Vs) - A.dot(Is))  #Résolution du
système linéaire (1X1 ici) pour trouver le vecteur des potentiels aux noeuds
V = A.T.dot(Upsilon)    #On remonte sur les tensions
I = Y.dot(V) + Is - Y.dot(Vs)   #On en déduit les courants par l'équation constitutive
print ( "\nResultat de la methode des potentiels aux noeuds :\n", "\nUpsilon = \n", #Affichage
des vecteurs V et I trouvés par cette méthode
      Upsilon, "\n\nV = \n", V, "\n\nI = \n", I )
```

 # ----- Methode des courants de mailles -----

```
Iota = np.linalg.solve(M.dot(Z).dot(M.T), M.dot(Z).dot(Is) - M.dot(Vs)) #Résolution du système
linéaire (15X15 ici) pour trouver le vecteur des courants de mailles
I = M.T.dot(Iota) #On remonte sur les courants
V = Z.dot(I) + Vs - Z.dot(Is)  #On en déduit les tensions par l'équation constitutive

print ("\nResultat de la methode des courants de mailles :\n", "\nIota = \n", Iota, #Affichage
des vecteurs I et V trouvés par cette méthode
"\n\nI = \n", I, "\n\nV = \n", V )
```

 # ----- Calcul des pssances et verification du theoreme de Tellegen -----

```
Scomplexe = I.conj() * V    # Calcul de la puissance complexe
print ("\nPuissance complexe = \n", Scomplexe,
"\n\nVerification du theoreme de Tellegen : V*I.T =\n", I.conj().T.dot(V) )  # Le produit
scalaire des vecteurs tensions/courants doit être nul,

print ( "\nValeurs efficaces des tensions (V) = \n", np.absolute(V),  # La fonction absolute
renvoie le module de chaque complexe constitutif du vecteur V (=valeur efficace)
"\nAngle des tensions (degres)= \n", np.angle(V, deg=True) )   #  Calcul du déphasage de la
tension par la fonction angle renvoyant l'argument de chaque complexe de V

print ( "\nValeurs efficaces des courants (A) = \n", np.absolute(I),  # La fonction absolute
renvoie le module de chaque complexe constitutif du vecteur I (=valeur efficace)
"\nAngle des courants (degres)= \n", np.angle(I, deg=True) )    #  Calcul du déphasage de la
tension par la fonction angle renvoyant l'argument de chaque complexe de I
cond_AYAT = np.linalg.cond(A.dot(Y).dot(A.T))
print(cond_AYAT)   #Affichage du conditionnement : il vaut 1
```

A5 : Résultat du programme Python

----- Verification du theoreme de Tellegen -----

A*M.T =
[[0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.]]

Le théorème de Tellegen est bien respecté, c'est à dire que la somme algébrique des puissances instantanées dans le circuit fermé de l'habitation est nul.

----- Resultat de la methode des potentiels aux nœuds -----

Upsilon =
[[229.96019374+0.00302247j]]

Le potentiel au nœud 1 est bien de 230V.

V =
[[-229.96019374-0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]]

La tension de la première branche est négative car il s'agit de la branche où se trouve la source, or on est en convention récepteur, d'où le « - ». Toutes les tensions ont bien une valeur absolue proche de 230V, la tension efficace du réseau. La partie imaginaire obtenue résulte de légères erreurs de calcul.

I =
[[3.98062626e+01-3.02247428e+00j]
[1.95616941e-01+1.04332338e-01j]
[4.34707361e-01+5.71356197e-06j]
[3.32549817e-01+9.99870638e-02j]
[3.14392676e+00-6.38358532e-01j]
[1.03023970e+00+1.27370611e+00j]
[3.69492380e-02+6.75321124e-02j]
[1.99959364e-02+4.58180887e-02j]
[3.47304958e+00+4.56479135e-05j]
[8.91150089e+00+1.17128020e-04j]
[6.09682039e-01-3.77835901e-01j]
[6.23808702e+00-2.76868314e+00j]
[3.47771523e-01-4.28683201e-01j]
[4.96435806e+00+6.52488777e-05j]
[1.37368053e+00-4.00637229e-01j]
[8.69414721e+00+1.14271239e-04j]]

Les courants complexes possèdent bien une réactance négative et positive respectivement pour des appareils capacitifs et inductif.

Ainsi, les lampes fluocompactes (L2), lampes LED (L4), les ordinateurs (L6), la Box WIFI (L7) et l'imprimante (L8) ont clairement un comportement capacitif, d'où un courant en avance sur la tension, donc une partie imaginaire positive.

En revanche, l'aspirateur (L5), la hotte aspirante (L11), le micro-ondes (L12 : pour cet appareil, c'est une supposition, car le comportement varie selon les appareils), le frigidaire (L13) ou la machine à laver (L14) ont un comportement plutôt inductif, d'où un courant en retard sur la tension, donc une partie imaginaire négative. Pour les autres appareils, purement résistif, ils présentent généralement une partie imaginaire ridiculement faible.

----- Resultat de la methode des courants de mailles -----

Iota =

```
[[39.80626261-3.02247428e+00j]
[39.61064567-3.12680662e+00j]
[39.1759383 -3.12681233e+00j]
[38.84338849-3.22679940e+00j]
[35.69946172-2.58844086e+00j]
[34.66922202-3.86214697e+00j]
[34.63227278-3.92967908e+00j]
[34.61227684-3.97549717e+00j]
[31.13922726-3.97554282e+00j]
[22.22772637-3.97565995e+00j]
[21.61804433-3.59782405e+00j]
[15.37995732-8.29140910e-01j]
[15.03218579-4.00457709e-01j]
[10.06782774-4.00522958e-01j]
[ 8.69414721+1.14271239e-04j]]
```

Les courants de mailles ont tous une partie réelle positive, cohérente avec la convention récepteur choisie.

I =

```
[[3.98062626e+01-3.02247428e+00j]
[1.95616941e-01+1.04332338e-01j]
[4.34707361e-01+5.71356197e-06j]
[3.32549817e-01+9.99870638e-02j]
[3.14392676e+00-6.38358532e-01j]
[1.03023970e+00+1.27370611e+00j]
[3.69492380e-02+6.75321124e-02j]
[1.99959364e-02+4.58180887e-02j]
[3.47304958e+00+4.56479135e-05j]
[8.91150089e+00+1.17128020e-04j]
[6.09682039e-01-3.77835901e-01j]
[6.23808702e+00-2.76868314e+00j]
[3.47771523e-01-4.28683201e-01j]
[4.96435806e+00+6.52488776e-05j]
[1.37368053e+00-4.00637229e-01j]
[8.69414721e+00+1.14271239e-04j]]
```

Les résultats sont rigoureusement identiques à ceux trouvées par la méthode des potentiels aux nœuds, malgré une taille 15 fois plus grande du système à inverser. La légère différence qu'il peut y avoir à la dernière décimale est liée à la précision de calcul.

V =

```
[[-229.96019374-0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
[ 229.96019374+0.00302247j]
```

Là encore, les résultats sont identiques et les mêmes commentaires s'appliquent pour cette méthode.

[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]
[229.96019374+0.00302247j]]

Puissance complexe =

[[-9.15384673e+03-6.95169085e+02j]
[4.49844250e+01-2.39916933e+01j]
[9.99653889e+01-2.16840434e-19j]
[7.64735225e+01-2.29920394e+01j]
[7.22976078e+02+1.46806554e+02j]
[2.36917972e+02-2.92898589e+02j]
[8.49705805e+00-1.55295860e+01j]
[4.59840789e+00-1.05362761e+01j]
[7.98663155e+02+0.00000000e+00j]
[2.04929047e+03+0.00000000e+00j]
[1.40201458e+02+8.68890598e+01j]
[1.43450333e+03+6.36705765e+02j]
[7.99723111e+01+9.85811231e+01j]
[1.14160474e+03+0.00000000e+00j]
[3.15890629e+02+9.21347667e+01j]
[1.99930778e+03+0.00000000e+00j]]

La puissance complexe trouvée est en accord avec les données du tableau figure 21. La puissance apparente négative (sans sens physique) de la première ligne correspond à celle de la petite résistance en série (0,01 Ohm), qui voit à ses bornes une tension « négative ». (convention récepteur).

Bien évidemment, la même remarque que précédemment est à faire : si l'appareil est à tendance capacitive, sa puissance complexe aura une partie imaginaire négative, et inversement.

Verification du theoreme de Tellegen : V*I.T =

[[-5.58962827e-10-1.51287594e-10j]]

Le théorème de Tellegen est bien vérifié : la somme des puissance instantanées de tous les composants (y compris la source) est bien nulle, aux incertitudes de calcul de la machine près (de l'ordre de 10^-16).

Valeurs efficaces des tensions (V) =

[[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]
[229.96019376]]

Les valeurs efficaces correspondent aux modules des tensions complexes précédemment trouvées. Elles sont donc toutes positives, et proche de la tension efficace du réseau (230V).

Angle des tensions (degres)=

[[-1.79999247e+02]
[7.53065203e-04]
[7.53065203e-04]
[7.53065204e-04]

Les tensions, définies comme référence de phase, ont un déphasage quasi nul.

[7.53065204e-04]
[7.53065204e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065201e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]]

Valeurs efficaces des courants (A) =

[[39.92084535]
[0.22170075]
[0.43470736]
[0.34725609]
[3.20807997]
[1.63820667]
[0.07697943]
[0.04999135]
[3.47304958]
[8.91150089]
[0.71726714]
[6.82490556]
[0.55200935]
[4.96435806]
[1.43091173]
[8.69414721]]

Angle des courants (degres)=

[[-4.34211485e+00]
[2.80732400e+01]
[7.53065203e-04]
[1.67343473e+01]
[-1.14775879e+01]
[5.10322677e+01]
[6.13153511e+01]
[6.64225746e+01]
[7.53065202e-04]
[7.53065202e-04]
[-3.17875776e+01]
[-2.39333373e+01]
[-5.09491244e+01]
[7.53065202e-04]
[-1.62594516e+01]
[7.53065202e-04]]

On retrouve presque exactement les mêmes valeurs que celles du tableau figure 21 ! Par exemple, pour les lampes fluo-compactes (L2), on trouvait Iexp = 0,222 A d'après le tableau. Ici, on trouve I =0,2217 A, soit des valeurs très proches.

On trouve en revanche un courant total It = 41,7 A, tandis que celui circulant dans la petite résistance fictive de 0,01 Ohm est de 39,92 A. L'écart relatif entre les deux valeurs est donc de :

$$Er = \left(\frac{41{,}7 - 39{,}92}{41{,}7}\right) \times 100 = 4{,}3\%$$

Cet écart s'explique par deux raisons :

1) La présence de cette légère résistance, qui consomme un peu de courant.
2) La raison principale reste la valeur approximative de la tension du réseau, considérée à 230 V alors qu'elle était proche de 238 V dans la maison. En refaisant les calculs avec 238V, on trouve It=41,3 A, beaucoup plus proche de la valeur trouvée par le th. De Boucherot.

Les angles des courants sont respectivement positif s'il s'agit d'un appareil capacitif et inductif sinon, conformément à ce qui a été dit. On retrouve bien ces résultats ici. Par exemple, les lampes fluocompactes (L2) ont bien un angle des courants θi positif, le courant est donc bien en avance sur la tension dans ce cas.

Bibliographie

Electrotechnique. (s.d.). Récupéré sur EEA Bordeaux: http://ressources.eeabx.free.fr/html/cadre_downloads.htm

Espace Client EDF. (2023, Juin). Récupéré sur EDF: https://particulier.edf.fr/fr/accueil/gestion-contrat/mon-compte-edf.html

Les régimes de neutre. (2023). Récupéré sur Abcclim: https://www.abcclim.net/regime-neutre-tt-tnc-tns-it.html

Mon compte particulier Enedis. (2023, Juin). Récupéré sur Enedis: https://mon-compte-particulier.enedis.fr/suivi-de-mesures/

NF C 15-100 : Tout savoir sur la norme pour les installations électriques. (2023). Récupéré sur Schneider Electric: https://www.se.com/fr/fr/work/support/local/reglementation/norme-nfc15-100/

NF C 15-100. (2023, 02 6). Récupéré sur Wikipedia: https://fr.wikipedia.org/wiki/NF_C_15-100

On vous dit tout sur la norme NF C 15-100. (2021). Récupéré sur Legrand: https://www.legrand.fr/pro/normes-et-reglementations/norme-nf-c-15-100/norme-nf-c-15-100-suivez-le-guide?gad=1&gclid=CjwKCAjwvpCkBhB4EiwAujULMoPWkEGtJ6h2cy4KCiXHE1m0ovJLJvq_Wh6jsw6Dz-ew44xGd4UajhoCPyEQAvD_BwE

Symboles normalisés. (s.d.). Récupéré sur Promotolec: https://sitelec.org/download_page.php?filename=promotelec/symboles.pdf

Types de prises électriques. (2023, Avril 10). Récupéré sur Worldstandards: https://www.worldstandards.eu/fr/electricite/types-de-prises/